

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2002 年 11 月 21 日 (21.11.2002)

PCT

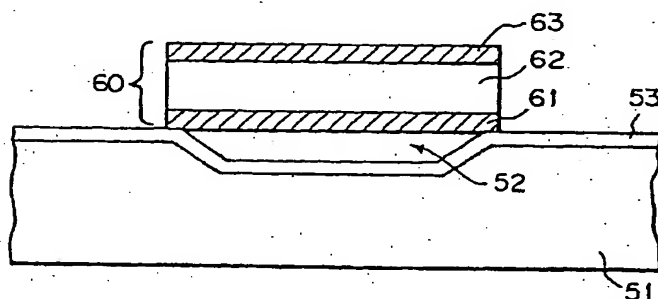
(10) 国際公開番号  
WO 02/093549 A1

- (51) 国際特許分類: G10K 11/04, H03H 9/54 特願2001-182194 2001 年 6 月 15 日 (15.06.2001) JP
- (21) 国際出願番号: PCT/JP02/04574 (71) 出願人: 宇部エレクトロニクス株式会社 (UBE ELECTRONICS, LTD.) [JP/JP]; 〒759-2214 山口県 美祿市 大嶺町奥分字麦川 2 0 2 3 番地 2 Yamaguchi (JP).
- (22) 国際出願日: 2002 年 5 月 10 日 (10.05.2002)
- (25) 国際出願の言語: 日本語 (72) 発明者: 山田 哲夫 (YAMADA, Tetsuo); 〒755-8633 山口県 宇部市 大字小串 1 9 7 8 番地の 5 宇部興産株式会社宇部研究所内 Yamaguchi (JP). 長尾 圭吾 (NAGAO, Keigo); 〒755-8633 山口県 宇部市 大字小串 1 9 7 8 番地の 5 宇部興産株式会社宇部研究所内 Yamaguchi (JP). 橋本 智仙 (HASHIMOTO, Chisen); 〒755-8633 山口県 宇部市 大字小串 1 9 7 8 番地の 5 宇部興産株式会社宇部研究所内 Yamaguchi (JP).
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2001-141845 2001 年 5 月 11 日 (11.05.2001) JP  
特願2001-141848 2001 年 5 月 11 日 (11.05.2001) JP

[続葉有]

(54) Title: THIN FILM ACOUSTIC RESONATOR AND METHOD OF MANUFACTURING THE RESONATOR

(54) 発明の名称: 薄膜音響共振器及びその製造方法



(57) Abstract: A high performance thin film acoustic resonator with excellent electromechanical coupling factor and acoustic quality factor, wherein a recess (52) is formed in a substrate obtained by forming a silicon oxide thin layer (53) on the surface of a silicon wafer (51), a sandwiched structural body (60) formed of a piezoelectric body layer (62) and a lower electrode (61) and an upper electrode (63) stuck on the both surfaces thereof is disposed so as to bridge the recess (52), the upper surface of the lower electrode

(61) and the lower surface of the piezoelectric body layer (62) stuck thereon are 25 nm or below in RMS variation of height, and the thickness of the lower electrode (61) is 150 nm or below.

(57) 要約:

シリコンウェーハ (51) の表面に酸化シリコン薄層 (53) の形成された基板に、窪み (52) が形成されている。窪み (52) をまたぐように、圧電体層 (62) とその両面に接合された下方電極 (61) 及び上方電極 (63) とからなる挟み込み構造体 (60) が配置されている。下方電極 (61) の上面及びこれと接合されている圧電体層 (62) の下面は、高さの RMS 変動が 25 nm 以下である。下方電極 (61) の厚さは 150 nm 以下である。これにより、電気機械結合係数及び音響品質係数などに優れた高性能の薄膜音響共振器が提供される。

WO 02/093549 A1



(74) 代理人: 山下 稔平 (YAMASHITA, Johei); 〒105-0001  
東京都港区虎ノ門五丁目13番1号虎ノ門40森  
ビル 山下国際特許事務所 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB,  
BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,  
DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU,  
ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS,  
LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO,  
NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL,  
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM,  
ZW.

(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW,  
MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許  
(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特  
許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,  
LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG,  
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:  
— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される  
各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語  
のガイダンスノート」を参照。

## 明 細 書

## 薄膜音響共振器及びその製造方法

5    技術分野

本発明は、圧電体薄膜の電気音響効果を利用した薄膜音響共振器に関するものであり、更に詳細に記せば、通信機用フィルタの構成要素として使用できる薄膜音響共振器及びその製造方法に関する。

また、本発明は、移動体通信機等に利用される薄膜振動子、薄膜VCO  
10    (電圧制御発信器)、薄膜フィルター、送受切替器や各種センサーなど、  
広範な分野で用いられる圧電体薄膜を利用した素子に関する。

背景技術

電子機器のコストおよび寸法を減らす必要性から、その回路構成要素と  
15    してのフィルタの寸法を小さくする試みが、一貫して続けられている。セル  
式電話およびミニチュア・ラジオのような民生用電子装置は、内蔵され  
る構成要素の大きさおよびコストの双方に関して厳しい要求を受けてい  
る。これらの電子装置に含まれる回路は、精密な周波数に同調させなけれ  
ばならないフィルタを利用している。したがって、廉価でコンパクトな  
20    フィルタを提供する努力が、絶えず続けられている。

また、圧電現象を利用する素子は広範な分野で用いられている。携帯電  
話機などの携帯機器の小型化と低消費電力化が進む中で、該機器に使用さ  
れるRF用およびIF用フィルターとして弾性表面波 (Surface  
Acoustic Wave: SAW) 素子の使用が拡大している。この  
25    SAWフィルターは設計および生産技術の向上によりユーザーの厳しい要  
求仕様に対応してきたが、利用周波数が高周波数化するに従って特性向上  
の限界に近づいており、電極形成の微細化と安定した出力確保との両面で  
大きな技術革新が必要となってきた。

一方、圧電体薄膜の厚み振動を利用した薄膜音響共振器すなわち薄膜バ  
30    ルク音響共振器又は薄膜バルク波音響共振子 (Thin Film Bu

1 k Acoustic Resonators又はFilm Bulk  
Acoustic Resonator: これらを以下FBARとい  
う) は、基板に設けられた薄い支持膜の上に、主として圧電体より成る薄  
膜と、これを駆動する電極とを形成したものであり、ギガヘルツ帯での基  
5 本共振が可能である。FBARでフィルターを構成すれば、著しく小型化  
でき、かつ低損失・広帯域動作が可能な上に、半導体集積回路と一体化  
することができるので、将来の超小型携帯機器への応用が期待されてい  
る。

10 薄膜音響共振器の一つの簡単な構成では、圧電体(PZ)薄膜材料の層  
が二つの金属電極の間に挟み込まれた挟み込み構造を形成している。この  
挟み込み構造は、周辺部を支持され中央部が空中に吊された橋架け構造に  
より支持される。二つの電極の間に印加される電圧により電界が発生する  
と、圧電体(PZ)薄膜材料は、電気エネルギーの幾らかを音波の形の機  
15 械エネルギーに変換する。音波は、電界と同じ方向に伝播し、電極/空気  
境界面で反射する。尚、以下において、圧電体をPZと略記することがあ  
る。

機械的に共振している時、PZ薄膜材料の電気エネルギー/機械エネル  
ギー変換機能により、薄膜音響共振器は電気共振器としての役割を果た  
す。したがって、これを用いてフィルタを構成することができる。薄膜音  
20 響共振器の機械的共振は、音波が伝播する材料の厚さが音波の半波長と等  
しくなる周波数で発生する。音波の周波数は、電極に印加される電気信号  
の周波数に等しい。音波の速度は光の速度より5~6桁小さいから、得ら  
れる共振器を極めてコンパクトにすることができる。このため、GHz帯  
の用途のための共振器を、平面寸法200ミクロン未満、厚さ数ミクロン  
25 未満の構造で構成することができる。

以上のような薄膜音響共振器及び上記挟み込み構造を積層した形態の積  
層型薄膜音響共振器すなわち積層型薄膜バルク音響共振器およびフィルタ  
(Stacked Thin Film Bulk Acoustic  
Wave Resonators and Filters: 以下SBA  
30 Rという) において、挟み込み構造の中心部はスパッタ法により作製され



た厚さ約1〜2ミクロン程度の圧電体薄膜である。上方および下方の電極は、電気リードとして働き、圧電体薄膜を挟み込んで圧電体薄膜を貫く電界を与える。圧電体薄膜は、電界エネルギーの一部を力学エネルギーに変換する。時間変化する印加電界エネルギーに応答して、時間変化する「応力／歪み」エネルギーが形成される。

このような弾性波を利用した共振器やフィルター等に応用される圧電体薄膜素子は、以下のようにして製造される。シリコンなどの半導体単結晶基板や、シリコンウエハーなどの上に多結晶ダイヤモンドやエリンバーなどの恒弾性金属の膜を形成してなる基板の表面上に、種々の薄膜形成方法によって、誘電体薄膜、導電体薄膜またはこれらの積層膜からなる下地膜を形成する。この下地膜上に圧電体薄膜を形成し、さらに必要に応じた上部構造を形成する。各膜の形成後に、または全ての膜を形成した後に、各々の膜に物理的処理または化学的処理を施すことにより、微細加工やパターニングを行う。

FBARまたはSBARを薄膜音響共振器として動作させるには、圧電体薄膜を含む挟み込み構造を橋架け構造により支持して、音波を挟み込み構造内に閉じ込めるための空気／結晶境界面を形成しなければならない。挟み込み構造は、通常、基板表面上に下方電極（下部電極）、圧電体層（圧電体膜、圧電体薄膜層）、および上方電極（上部電極）をこの順に堆積させることにより作られる。したがって、挟み込み構造の上側には、空気／結晶境界面が既に存在している。挟み込み構造の下側にも空気／結晶境界面を設けなければならない。この挟み込み構造の下側の空気／結晶境界面を得るのに、従来、以下に示すような幾つかの方法が用いられている。

第1の方法は、例えば特開昭58-153412号公報や特開昭60-142607号公報に記載のように、基板を形成しているウェーハのエッチング除去を利用している、基板がシリコンからなるものであれば、加熱KOH水溶液を使用してシリコン基板の一部を裏側からエッチングして取り去って孔を形成する。基板の上面上に下地膜、下部電極、圧電体薄膜及び上部電極を形成した後に、基板の下面から振動部となる部分の下にある

基板部分を除去する。これにより、挟み込み構造の縁をシリコン基板の前面側において孔の周囲の部分で支持した形態を有する共振器が得られる。しかし、このようなウェーハを貫いて開けられた孔は、ウェーハを非常に繊細にし、且つ、非常に破壊しやすくする。更に、基板表面に対して5  
4. 7度のエッチング傾斜でKOHを用いた湿式エッチングを行うと、最終製品の取得量、即ち、ウェーハ上のFBAR/SBARの歩留まりの向上が困難である。たとえば、250 $\mu$ m厚さのシリコンウェーハの上に構成される約150 $\mu$ m $\times$ 150 $\mu$ mの横寸法（平面寸法）を有する挟み込み構造は、約450 $\mu$ m $\times$ 450 $\mu$ mの裏側エッチング孔開口を必要とする。したがって、ウェーハの約1/9を生産に利用できるだけである。異方性エッチングにより基板から圧電体薄膜の振動部の下に位置する部分を除去した浮き構造を作製した後に、1素子単位ごとに分離してPZ薄膜素子である薄膜音響共振器（これは圧電薄膜共振子とも呼ばれている）を得る。

挟み込み構造の下に空気/結晶境界面を設ける従来の第2の方法は、例えば特開平2-13109号公報に記載のように、空気ブリッジ式FBAR素子を作ることである。通常、最初に犠牲層（Sacrificial layer）を設置し、次にこの犠牲層の上に挟み込み構造を作製する。プロセスの終りまたは終り近くに犠牲層を除去する。処理はすべてウェーハの前面側で行われるから、この方法は、ウェーハ両面側の位置合わせも大面積の裏側開口も必要としない。

特開2000-69594号公報には、犠牲層として磷酸石英ガラス（PSG）を使用した空気ブリッジ式FBAR/SBARの構成と製造方法とが記載されている。同公報においては、PSG層がシリコンウェーハ上に堆積されている。PSGは、シランおよびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を使用して約450℃までの温度で堆積され、燐含有量約8%である軟ガラス様物質を形成する。PSGは、比較的低温で堆積させることができ、且つ、希釈H<sub>2</sub>O:H<sub>2</sub>F溶液で非常に高い速度でエッチングされる。

しかしながら、同公報においては、PSG犠牲層の表面粗度を示す高さのRMS（2乗平均平方根）変動が0.5 $\mu$ m未満と記載されているもの

の、具体的には $0.1\mu\text{m}$ より小さいオーダーのRMS変動の具体的記載はない。この $0.1\mu\text{m}$ オーダーのRMS変動は、原子的レベルからみると非常に粗い凹凸である。FBAR/SBAR形式の薄膜音響共振器は、結晶が電極平面に垂直な柱状晶を成して成長する圧電体材料を必要とする。特開2000-69594号公報では、PSG層の表面に平行な導電シートを形成しており、該導電シートの高さのRMS変動は $2\mu\text{m}$ 未満と記載されているものの、具体的には $0.1\mu\text{m}$ より小さいオーダーのRMS変動の具体的記載はない。この $0.1\mu\text{m}$ オーダーのRMS変動は、薄膜音響共振器用の圧電体薄膜を形成する表面としては不十分な表面粗さである。圧電体薄膜を成長させる試みが行われたが、粗面上の多数の凹凸の影響で多様な方向に結晶が成長するので、得られた圧電体薄膜の結晶品質は必ずしも十分でなかった。

以上のような空気/結晶境界面を設ける代わりに、適切な固体音響ミラーを設ける方法もある。この方法は、例えば特開平6-295181号公報に記載のように、挟み込み構造の下に音響的ブラッグ反射鏡からなる大きな音響インピーダンスが作り出される。ブラッグ反射鏡は、高低の音響インピーダンス材料の層を交互に積層することにより作られる。各層の厚さは共振周波数の波長の $1/4$ に固定される。十分な層数により、圧電体/電極境界面における有効インピーダンスを、素子の音響インピーダンスよりはるかに高くすることができ、したがって、圧電体内の音波を有効に閉じ込めることができる。この方法により得られる音響共振器は、挟み込み構造の下に空隙が存在しないので、固体音響ミラー取付け共振器(SMR)と呼ばれる。

この方法は、周辺部が固定され中心部が自由に振動できる膜を作るという前述の第1の方法及び第2の方法の問題を回避しているが、この方法にも多数の問題点がある。即ち、金属層はフィルタの電気性能を劣化させる寄生コンデンサを形成するのでブラッグ反射鏡の層に使用できないから、ブラッグ反射鏡に使用する材料の選択には制限がある。利用可能な材料から作られる層の音響インピーダンスの差は大きくない。したがって、音波を閉じ込めるには、多数の層が必要である。この方法は、各層にかかる応

力を精密に制御しなければならないので、製作プロセスが複雑である。また、10ないし14といった多数の層を貫くバイアを作るのは困難であるから、この方法により得られる音響共振器は他の能動要素との集積化には不都合である。更に、これまでに報告された例では、この方法により得られる音響共振器は、空気ブリッジを有する音響共振器より有効結合係数が  
5 かなり低い。その結果、SMRに基づくフィルタは、空気ブリッジ式の音響共振器を用いたものに比較して、有効帯域幅が狭い。

ところで、上記のように、薄膜音響共振器においては、時間変化する印加電界エネルギーに応答して、挟み込み構造に時間変化する「応力／歪み」エネルギーが形成される。従って、基板と挟み込み構造の下方電極との間の密着力が低い場合には、基板と挟み込み構造とが剥離して耐久性が低下し即ち薄膜音響共振器の寿命が短くなる。  
10

上記の特開2000-69594号公報等には、好適な電極材料としてMoが記載されているが、基板となるシリコンウェーハ等との更なる密着性の向上に関する特別の記載はない。  
15

また、例えば特開平2-309708号公報等には、下方電極層としてAu/Ti等の2層からなるものを用いることが記載されている。この場合、Ti層はAu層と基板との密着性を高める層として存在している。即ち、このTi密着層は薄膜音響共振器の本来の動作の点からは必須の電極層ではないが、Ti密着層を形成せずにAu電極層を単独で形成した場合には、基板とAu電極層との間の密着力が乏しくなり、剥離等の発生により薄膜音響共振器の動作時の耐久性を著しく損なうこととなる。  
20

以上のような薄膜音響共振器では、電極面に対し直角の方向に伝搬する所要の縦方向振動の他に、電極面に平行の方向に伝搬する横方向振動も存在し、この横方向振動のうちには薄膜音響共振器の所要の振動にスプリアスを励振して共振器の特性を劣化させるものがある。  
25

本発明の目的は、改良された性能を有するFBAR/SBARを提供することである。

本発明の他の目的は、圧電体(PZ)薄膜の結晶品質を向上させることにより、電気機械結合係数、音響品質係数(Q値)、温度特性などに優れ  
30

た高性能のFBAR/SBARを提供することである。

本発明の更に別の目的は、上方電極の形状を工夫することにより、電気機械結合係数、音響品質係数（Q値）、温度特性などに優れた高性能のFBAR/SBARを提供することである。

- 5      また、本発明の他の目的は、特にスプリアス励振が低減されたFBAR/SBARを提供することにある。

本発明の他の目的は、下方電極層と基板との密着性（接合強度）を向上させることでFBAR/SBARの耐久性を向上させ長寿命化を図ることにある。

- 10      本発明の更なる目的は、下方電極層と基板との密着性を向上させると共に、下方電極層上での結晶品質及び配向性の良好な圧電体薄膜の形成を可能とすることで、電気機械結合係数や音響品質係数（Q値）などに優れた高性能なFBAR/SBARを提供することである。

- 15      圧電体薄膜素子用の圧電体材料としては、窒化アルミニウム（AlN）、酸化亜鉛（ZnO）、硫化カドミウム（CdS）、チタン酸鉛〔PbTiO<sub>3</sub>〕（PbTiO<sub>3</sub>）、チタン酸ジルコン酸鉛〔PZT〕（Pb(Zr, Ti)O<sub>3</sub>）などが用いられている。特に、AlNは、弾性波の伝播速度が速く、高周波帯域で動作する薄膜音響共振器やフィルターの圧電薄膜共振子の圧電体材料として適している。

- 20      FBARは薄膜中における弾性波の伝播によって共振を得ているため、圧電体薄膜の振動特性はもとより、電極層や下地膜の振動特性がFBARの共振特性に大きく影響する。これまで、AlN薄膜をFBARに適用するために、種々の検討が行われてきた。しかしながら、未だ、ギガヘルツ帯域で十分な性能を発揮する薄膜音響共振器や薄膜フィルタは得られていない。よって、AlN薄膜のみならず、電極層や下地膜をも含めた振動部  
25      の電気機械結合係数、音響的品質係数、さらには共振周波数の温度安定性に優れた圧電薄膜共振子即ち薄膜音響共振器の実現が強く望まれている。

- 30      そこで、本発明は、弾性波の伝播速度が速いというAlN薄膜の特長を活かしつつ、電気機械結合係数および音響的品質係数を損なうことなく、

共振周波数の温度安定性を向上させた圧電薄膜共振子即ち薄膜音響共振器を提供することを目的とする。

### 発明の開示

5 本発明によれば、以上の如き目的を達成するものとして、

圧電体層と、該圧電体層の第1の表面に接合された第1の電極と、前記圧電体層の前記第1の表面と反対側の第2の表面に接合された第2の電極とを有しており、前記圧電体層の第1の表面は高さのRMS変動が25 nm以下、好ましくは20 nm以下であることを特徴とする薄膜音響共振器、  
10 が提供される。

本発明において、高さのRMS変動は、日本工業規格JIS B0601 : 2001「製品の幾何特性仕様（GPS）－表面性状：輪郭曲線方式－用語、定義及び表面性状パラメータ」に記載の二乗平均平方根粗さ：  
15  $R_q$ である（以下に記載の発明についても同様）。

また、本発明によれば、以上の如き目的を達成するものとして、

圧電体層と、該圧電体層の第1の表面に接合された第1の電極と、前記圧電体層の前記第1の表面と反対側の第2の表面に接合された第2の電極とを有しており、前記第1の電極の前記圧電体層の側の表面は高さのRMS変動が25 nm以下、好ましくは20 nm以下であることを特徴とする薄膜音響共振器、  
20 が提供される。

本発明の一態様においては、前記圧電体層の前記第2の表面は高さのRMS変動が前記圧電体層の厚さの5%以下である。本発明の一態様においては、前記第2の電極の表面のうねり高さは前記圧電体層の厚さの25%以下である。  
25

本発明の一態様においては、前記第2の電極は中央部と該中央部より厚い外周部とを有する。本発明の一態様においては、前記外周部は前記中央部の周囲に枠状に位置する。本発明の一態様においては、前記第2の電極は前記中央部の厚さ変動が該中央部の厚さの1%以下である。本発明の一  
30

態様においては、前記外周部の厚さは前記中央部の高さの1.1倍以上である。本発明の一態様においては、前記外周部は前記第2の電極の外縁から40  $\mu\text{m}$ までの距離の範囲内に位置する。本発明の一態様においては、前記中央部の表面のうねり高さは前記圧電体層の厚さの25%以下である。

本発明の一態様においては、前記圧電体層と前記第1の電極と前記第2の電極とからなる挟み込み構造体は、基板の表面に形成された窪みをまたぐように前記基板により縁部が支持されている。本発明の一態様においては、前記基板の表面上には、前記窪みをまたぐように形成された絶縁体層が配置されており、該絶縁体層上に前記挟み込み構造体が形成されている。

更に、本発明によれば、以上の如き目的を達成するものとして、

圧電体層と、該圧電体層の第1の表面に接合された第1の電極と、前記圧電体層の前記第1の表面と反対側の第2の表面に接合された第2の電極とを有する薄膜音響共振器を製造する方法であって、

基板の表面に窪みを形成し、該窪み内に犠牲層を充填し、該犠牲層の表面を高さのRMS変動が25 nm以下、好ましくは20 nm以下となるように研磨し、前記犠牲層の表面の一部の領域と前記基板の表面の一部の領域とにわたってそれらの上に前記第1の電極を形成し、該第1の電極上に前記圧電体層を形成し、該圧電体層上に前記第2の電極を形成し、前記窪み内から前記犠牲層をエッチング除去することを特徴とする、薄膜音響共振器の製造方法、  
が提供される。

本発明の一態様においては、前記第1の電極を厚さ150 nm以下に形成し、該第1の電極の上面を高さのRMS変動が25 nm以下、好ましくは20 nm以下となるようにする。

本発明の一態様においては、前記犠牲層の上に前記第1の電極を形成するに先立って絶縁体層を形成する。

次に、本発明によれば、以上の如き目的を達成するものとして、

基板と、該基板上に配置され該基板側の下方電極層及びこれと対をなす

上方電極層の間に圧電体薄膜層（圧電体層）を挟み込むように積層してなる挟み込み構造体とを備える薄膜音響共振器であって、

前記挟み込み構造体は更に前記下方電極層と前記基板との間に位置し且つ前記下方電極層と接合された密着電極層を有しており、該密着電極層は  
5 前記基板に前記挟み込み構造体の振動を許容するように形成された窪みの周囲において前記基板と接合されていることを特徴とする薄膜音響共振器、  
が提供される。

本発明の一態様においては、前記密着電極層は環状に形成されており、  
10 前記密着電極層の前記下方電極層と接する部分の平面面積を  $S_1$  とし、前記下方電極層の平面面積を  $S_2$  としたとき、 $0.01 \times S_2 \leq S_1 \leq 0.5 \times S_2$  の関係が成り立ち、前記上方電極層は前記密着電極層の内側に対応する領域に位置している。

本発明の一態様においては、前記密着電極層は  $Ti$ 、 $Cr$ 、 $Ni$ 、 $Ta$   
15 より選ばれる少なくとも一種を含む材料で構成されており、前記下方電極層は  $Au$ 、 $Pt$ 、 $W$ 、 $Mo$  より選ばれる少なくとも一種を含む材料で構成されており、前記圧電体薄膜層は  $AlN$  または  $ZnO$  で構成されている。

また、本発明によれば、以上の如き目的を達成するものとして、  
20 窪みが形成されている基板の表面において前記窪みの周囲に密着電極層を形成し、該密着電極層より内側の前記窪みに対応する領域にて前記基板の表面上に犠牲層を形成し、該犠牲層の表面を研磨して高さの  $RMS$  変動が  $25\text{ nm}$  以下、好ましくは  $20\text{ nm}$  以下となるように平滑化し、前記犠牲層及び前記密着電極層の上に下方電極層、圧電体薄膜層及び上方電極層  
25 を順次形成し、しかる後に前記犠牲層を除去することを特徴とする、薄膜音響共振器の製造方法、  
が提供される。

本発明の一態様においては、前記犠牲層の形成は、先ず前記基板及び前記密着電極層を覆うように犠牲層材料の層を形成し、次いで該犠牲層材料  
30 の層を前記密着電極層の表面が露出するように研磨することで行われ、前



記憶性層の除去はエッチングにより行われ、前記憶性層としてガラス又はプラスチックを用いる。

本発明者らは、A1Nを主成分とする圧電体薄膜の両面に、弾性率が金、白金、アルミニウム及び銅等の一般的な電極材料に比べて大きく、熱弾性損失が著しく小さいモリブデン(Mo)を主成分とする電極を形成し、さらに、前記圧電体薄膜の共振周波数の温度係数と異符号の温度係数を有する酸化シリコン(SiO<sub>2</sub>)または窒化シリコン(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)を主成分とする絶縁層を振動部に含めて形成することにより、高い電気機械結合係数と高い音響的品質係数とを維持しつつ共振周波数の温度安定性を改善することができることを見出し、本発明に到達した。さらに、窒化アルミニウムを主成分とする圧電体薄膜の厚さを $t$ とし、前記酸化シリコンまたは窒化シリコンを主成分とする絶縁層の厚さ(絶縁層が複数ある場合にはそれらの厚さの合計)を $t'$ とした時に、 $0.1 \leq t'/t \leq 0.5$ 好ましくは $0.2 \leq t'/t \leq 0.4$ を満たすように各層の厚みを設定することにより、高い電気機械結合係数と高い音響的品質係数とを有し、温度安定性が著しく良好な高性能FBARを実現できることを見出した。

即ち、本発明によれば、上記の目的を達成するものとして、

基板と、該基板上に形成された圧電積層構造体とを有しており、前記圧電積層構造体の一部を含んで振動部が構成されており、前記圧電積層構造体は下部電極(下方電極)、圧電体膜(圧電体層)および上部電極(上方電極)を前記基板の側からこの順に積層してなるものであり、前記基板は前記振動部に対応する領域にて該振動部の振動を許容する空隙を形成している圧電薄膜共振子において、

前記圧電体膜が窒化アルミニウムを主成分とするものであり、前記下部電極および前記上部電極がモリブデンを主成分とするものであり、前記振動部は前記圧電積層構造体に接合された少なくとも1層の酸化シリコンまたは窒化シリコンを主成分とする絶縁層の少なくとも一部を含んでなることを特徴とする圧電薄膜共振子、

が提供される。尚、本明細書において、用語「圧電薄膜共振子」は用語「薄膜音響共振器」と同義である。

本発明の一態様においては、前記圧電体膜の厚さ $t$ と前記少なくとも1層の絶縁層の厚さの合計 $t'$ とが $0.1 \leq t'/t \leq 0.5$ の関係を満たす。

5 本発明の一態様においては、前記圧電体膜は前記窒化アルミニウムの含有量が90当量%以上である。本発明の一態様においては、前記絶縁層は前記酸化シリコンまたは窒化シリコンの含有量が50当量%（モル%）以上である。本発明の一態様においては、前記下部電極及び前記上部電極は前記モリブデンの含有量が80当量%（モル%）以上である。

10 本発明の一態様においては、前記絶縁層のうちの1つが前記基板の表面上に形成されている。本発明の一態様においては、前記絶縁層のうちの1つが前記圧電積層構造体の前記基板と反対の側の表面上に形成されている。

本発明の一態様においては、前記基板はシリコン単結晶からなる。本発明の一態様においては、前記上部電極は互いに離隔して形成された第1の電極部と第2の電極部とからなる。

15 本発明の一態様においては、2.0GHz近傍における共振周波数及び反共振周波数の測定値から求めた電気機械結合係数が4.0～6.5%であり、音響的品質係数が750～2000であり、共振周波数の温度係数が $-20 \sim 20 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ である。

20 さらに、本発明によれば、以上のような圧電薄膜共振子を用いて構成されるVCO（電圧制御発振器）、フィルタおよび送受切替器が提供され、それらにおいて1GHz以上の高い周波数での特性を著しく向上させることができる。

## 25 図面の簡単な説明

図1は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの基本構成を説明するための模式的断面図である。

図2は、本発明による薄膜音響共振器であるSBARの基本構成を説明するための模式的断面図である。

30 図3は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそ

れにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図である。

図4は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図である。

図5は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図である。

図6は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図である。

図7は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的平面図である。

図8は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図である。

図9は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図である。

図10は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図である。

図11は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図である。

図12は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの上方電極の平面図である。

図13は、本発明によるFBARの模式的断面図である。

図14は、本発明によるSBARの模式的断面図である。

図15は、本発明によるFBAR及びその製造方法を説明するための模式的断面図である。

図16は、本発明によるFBAR及びその製造方法を説明するための模式的断面図である。

5 図17は、本発明によるFBAR及びその製造方法を説明するための模式的断面図である。

図18は、本発明によるFBAR及びその製造方法を説明するための模式的断面図である。

10 図19は、本発明によるFBAR及びその製造方法を説明するための模式的断面図である。

図20は、本発明によるFBAR及びその製造方法を説明するための模式的断面図である。

図21は、本発明によるFBAR及びその製造方法を説明するための模式的平面図である。

15 図22は、本発明による圧電薄膜共振子の実施形態を示す模式的平面図である。

図23は、図22のX-X断面図である。

図24は、本発明による圧電薄膜共振子の実施形態を示す模式的平面図である。

20 図25は、図24のX-X断面図である。

図26は、本発明による圧電薄膜共振子の実施形態を示す模式的平面図である。

図27は、図26のX-X断面図である。

25 図28は、本発明による圧電薄膜共振子の実施形態を示す模式的平面図である。

図29は、図28のX-X断面図である。

#### 発明を実施するための最良の形態

以下、本発明の実施の形態を、図面を参照しながら説明する。

30 図1および図2は、それぞれ、本発明による薄膜音響共振器であるFB

A RおよびS B A Rの基本構成を説明するための模式的断面図である。

図1において、F B A R 20は、上方電極21および下方電極23を備え、これらは圧電体(P Z)材料の層22の一部を挟み込んで挟み込み構造を形成している。好適なP Z材料は窒化アルミニウム(A l N)または  
5 酸化亜鉛(Z n O)である。F B A R 20に使用される電極21, 23は、好適にはモリブデンから作られるが、他の材料を使用することも可能である。

この素子は、薄膜P Z材料内のバルク弾性音響波の作用を利用している。印加電圧により二つの電極21, 23の間に電界が生ずると、P Z材  
10 料は電気エネルギーの一部を音波の形の機械的エネルギーに変換する。音波は電界と同じ方向に伝播し、電極/空気境界面で反射される。

機械的に共振している時、P Z材料の電気エネルギー/機械エネルギー変換機能により、音響共振器は電気共振器としての役割を果たす。したがって、素子は、ノッチフィルタとして動作することができる。素子の機械的  
15 共振は、音波が伝播する材料の厚さが当該音波の半波長と等しくなる周波数で発生する。音波の周波数は電極21, 23間に印加される電気信号の周波数である。音の速度は光の速度より5~6桁小さいから、得られる共振器を極めてコンパクトにすることができる。G H z帯の用途に対する共振器を、平面寸法が約100  $\mu$ mおよび厚さが数 $\mu$ mのオーダーで構成す  
20 ることができる。

次に、図2を参照してS B A Rについて説明する。S B A R 40は、帯域フィルタと類似の電氣的機能を与える。S B A R 40は、基本的には機械的に結合されている二つのF B A Rフィルタである。圧電体層41の共振周波数で電極43および44を横断する信号は、音響エネルギーを圧電  
25 体層42に伝える。圧電体層42内の機械的振動は、電極44および45を横断する電気信号に変換される。

図3~図8は、本発明による薄膜音響共振器であるF B A Rの製造方法及びそれにより得られたF B A Rの実施形態を説明するための模式的断面図(図3~図6, 図8)及び模式的平面図(図7)である。

30 先ず、図3に示されているように、集積回路製作に利用されている通常

のシリコンウェーハ51に、エッチングにより窪みを形成する。窪みの深さは好適には1.5~30 $\mu$ m、更に好ましくは1.5~10 $\mu$ mあるいは場合によっては3~30 $\mu$ mである。FBARの挟み込み構造の下空洞の深さは圧電体層により生ずる変位を許容すればよいことを考えれば、  
5 空洞の深さは数 $\mu$ mあれば十分である。

ウェーハ51の表面に熱酸化により酸化シリコンの薄層53を形成し、これにより、その上に以後の工程で形成される犠牲層のPSGからウェーハ51内に磷が拡散しないようにする。この薄層53としては、酸化シリコン層の代わりに、低圧CVD法により形成した窒化シリコン層を用いてもよい。このようにウェーハ内への磷の拡散を抑制することにより、シリコンウェーハが導体に変換されることが阻止され、作製された素子の電気的動作に対する悪影響をなくすることができる。以上のようにしてウェーハ51の表面に酸化シリコンまたは窒化シリコンの薄層53を形成したものを、基板として用いる。即ち、図3は、基板の表面に深さが好適には1.5~30 $\mu$ m、更に好ましくは1.5~10 $\mu$ mあるいは場合によっては3~30 $\mu$ mの窪み52を形成した状態を示す。  
10 15

次に、図4に示されているように、基板の酸化シリコンまたは窒化シリコンの薄層53上に燐酸石英ガラス(PSG)層55を堆積させる。PSGは、シランおよび $P_2O_5$ 源となる物質を原料に使用して約450℃までの温度で堆積され、燐含有量約8%の軟ガラス様物質を形成する。シランの例としては、モノシラン(Monosilane:  $SiH_4$ )、トリクロルシラン(Trichlorosilane:  $SiHCl_3$ )、テトラメトキシシラン(Silicon tetramethoxide:  $Si(OCH_3)_4$ )、テトラエトキシシラン(Silicon tetraethoxide:  $Si(OC_2H_5)_4$ )などが挙げられる。  
20 25  $P_2O_5$ 源となる物質の例としては、 $P_2O_5$ の他に、ホスフィン( $PH_3$ )、亜リン酸トリメチル(Trimethyl phosphite:  $P(OCH_3)_3$ )、亜リン酸トリエチル(Triethyl phosphite:  $P(OC_2H_5)_3$ )、リン酸トリメチル(Trimethyl phosphate:  $PO(OCH_3)_3$ )、リン酸トリエチル  
30

(Triethyl phosphate:  $\text{PO}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$ )などが挙げられる。この低温プロセスは、当業者に周知である。PSGは、比較的低温で堆積させることができ、且つ、希釈 $\text{H}_2\text{O}:\text{HF}$ 溶液で非常に高いエッチング速度でエッチングされる非常にクリーンな不活性材料であるから、犠牲層の材料として好適である。以後の工程で実行されるエッチングにおいて10:1の希釈割合で毎分約 $3\mu\text{m}$ のエッチング速度が得られる。

堆積したままのPSG犠牲層55の表面は、原子レベルでみると非常に粗い。したがって、堆積したままのPSG犠牲層55は、音響共振器を形成する基体としては不十分である。FBAR/SBAR形式の音響共振器は、結晶が電極面に垂直な柱状晶をなして成長する圧電材料を必要とする。微細な研磨粒子を含む研磨スラリーを用いてPSG犠牲層55の表面を磨いて滑らかにすることにより、優れた結晶の圧電材料の薄膜を形成する。

即ち、図5に示されているように、PSG層55の表面を粗仕上げスラリーで磨くことにより全体的に平面化して、窪み52の外側のPSG層の部分除去する。次に、残っているPSG層55を更に微細な研磨粒子を含むスラリーで磨く。代替方法として、磨き時間がかかってもよければ一つの更に微細なスラリーを用いて上記二つの磨きステップを実行してもよい。目標は、鏡面仕上げである。

本発明においては、PSG層を研磨する前に、緻密化とリフローとを兼ねて、PSG層を高温で熱処理することが好ましい。このPSG層の熱処理は、RTA (Rapid Thermal Anneal) 法により行なうことができる。これは、窒素雰囲気中または窒素-酸素混合雰囲気中で $750^\circ\text{C}\sim 950^\circ\text{C}$ の温度で行なわれる。または、高温熱処理を拡散炉またはランプ加熱により行なってもよい。本発明においては、PSG層を高温で熱処理することにより、PSG層をより緻密な構造にするとともに、その硬度を高める。硬度を高めることにより、その後のCMP (化学的機械的研磨) において、PSG膜表面にスクラッチ等の研磨傷が発生するのを抑制し、表面を良好に平坦化することができる。

以上のようにして窪み52に対応する位置にPSG層55を残留させた基板のクリーニングも重要である。スラリーはウェーハ上に少量のシリカ粗粉を残す。この粗粉を除去せねばならない。本発明の好適な実施形態では、この粗粉除去をポリテックス (Polytex (商標): ロデル・ニッタ社) のような堅いパッドの付いた第2の研磨具を使用して行う。その際の潤滑剤として、脱イオン水を使用し、磨いてから最終クリーニングステップの準備が完了するまでウェーハを脱イオン水中に入れておく。基板を、最後の磨きステップと最後のクリーニングステップとの間で乾燥させないように注意する。最後のクリーニングステップは、基板を色々な化学薬品の入っている一連のタンクに漬けることから成る。各タンクに超音波攪拌を加える。このようなクリーニング手段は当業者に周知である。

研磨剤は、シリカ微粒子から構成されている。本発明の好適な実施形態では、シリカ微粒子のアンモニア主体スラリー (Rodel Klebosol #30N: ロデル・ニッタ社) を利用する。

以上の説明では特定の研磨およびクリーニングの様式を示したが、必要な滑らかさの表面を与えるどんな研磨およびクリーニングの様式をも利用することができる。本発明の好適な実施形態では、最終表面は、原子間力顕微鏡プローブで測った高さのRMS変動が25nm以下 (好ましくは20nm以下) である。

以上のようにして表面をきれいにしてから、図6に示されているように、挟み込み構造体60の下方電極61を堆積させる。下方電極61の好適な材料は、モリブデン (Mo) である。しかし、下方電極61を他の材料たとえばAl、W、Au、PtまたはTiから構成することもできる。その低い熱弾性損失のためモリブデン (Mo) が好適である。たとえば、Moの熱弾性損失は、Alの約1/56である。

下方電極61の厚さも重要である。厚い層は、薄い層より表面が粗くなる。圧電体層62の堆積のための滑らかな表面を維持することは、得られる共振器の性能にとって非常に重要である。したがって、下方電極の厚さは、好適には150nm以下である。Moは好適にはスパッタリングにより堆積される。これにより、表面の高さのRMS変動が25nm以下 (好



ましくは20nm以下)のMo層が得られる。

下方電極61を堆積し終わってから、圧電体層62を堆積する。圧電体層62の好適な材料は、AlNまたはZnOであり、これもスパッタリングにより堆積される。本発明の好適な実施形態では、圧電体層62の厚さは、0.1μmから10μmの間(好ましくは0.5μm~2μm)にある。圧電体層62の上面は、高さのRMS変動が圧電体層厚さ(平均値)の5%以下であるのが好ましい。

最後に、上方電極63を堆積させる。上方電極63は、下方電極61と同様な材料から構成され、好適にはMoから構成される。

以上のようにして、下方電極61、圧電体層62及び上方電極63からなり、所要の形状にパターニングされた挟み込み構造体60を形成してから、図7に示されているように、挟み込み構造体60の端部または挟み込み構造体60により覆われずに露出している犠牲層55の部分から、希釈H<sub>2</sub>O:Hf溶液でエッチングすることにより、挟み込み構造体60の下方のPSGをも除去する。これにより、図8に示されているように、窪み52の上に橋架けされた挟み込み構造体60が残る。即ち、挟み込み構造体60は、基板の表面に形成された窪み52をまたぐように基板により縁部が支持されている。

以上のようにして得られたFBARにおいては、犠牲層55の表面(高さのRMS変動が25nm以下(好ましくは20nm以下))に従って、その上に形成された下方電極61の下面の高さのRMS変動が25nm以下(好ましくは20nm以下)であり、更に該下方電極61は厚さが薄いので上面も高さのRMS変動が25nm以下(好ましくは20nm以下)である。そして、この下方電極61の上面に従って、その上に形成された圧電体層62の下面の高さのRMS変動が25nm以下(好ましくは20nm以下)である。下方電極61の滑らかな上面は、圧電体層62の成長核となる結晶構造を備えていないにもかかわらず、形成される圧電体層62に非常に規則正しい構造のc軸配向を形成し優れた圧電特性を与える。

図9~図10は、本発明による音響共振器であるFBARの製造方法及

びそれにより得られたFBARの更に別の実施形態を説明するための模式的断面図である。この実施形態では、上記図3～5に関し説明したような工程の後に、図9に示されているように、絶縁体層54を形成する。絶縁体層54は、たとえばSiO<sub>2</sub>膜であり、CVD法により堆積することができる。なお、犠牲層55の除去のためのエッチング液に対する耐性を考慮すれば、絶縁体層54としてはSiO<sub>2</sub>膜よりも低圧CVD法により形成されたSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>膜を使用するほうが好ましい。絶縁体層54としてSiO<sub>2</sub>膜を使用する場合には、犠牲層55の除去のためのエッチングの際に、SiO<sub>2</sub>膜の露出面に適宜のプロテクトを施せばよい。

10      その上に、上記図6に関し説明したような工程を行って挟み込み構造体60を形成する。次いで、図10に示されているように、上記図7及び図8に関し説明したような工程を行って、FBARを得る。その際に、犠牲層55をエッチング除去するために、挟み込み構造体60の端部または挟み込み構造体60により覆われていない絶縁体層54の部分であって犠牲層55の上方の部分に適宜の大きさの開口を形成し、該開口からエッチング液を供給する。

15      本実施形態のFBARは、挟み込み構造体60と空洞52との間に絶縁体層54が配置されており、挟み込み構造体60に加えて絶縁体層54をも含んで振動部が構成されるので、該振動部の強度が向上し、更に振動部の振動における周波数温度特性が改善される。

20      絶縁体層54の厚さ $t'$ は、好ましくは50～1000nmの範囲内の値である。これは、圧電体層62の厚さ $t$ に対する絶縁体層54の厚さ $t'$ の比 $t'/t$ が0.1以上0.5以下の範囲内にあることが好ましく、圧電体層62の厚さ $t$ は上記のように500nm～2000nmの範囲内にあるのが好ましいからである。比 $t'/t$ が0.1以上0.5以下の範囲内にあることが好ましい理由としては、 $t'/t$ を0.1以上とすることで絶縁体層54を含む振動部の振動における周波数温度特性を改善する効果が高められ、 $t'/t$ を0.5以下とすることで絶縁体層54を含む振動部の振動における電気機械結合係数及び音響的品質係数(Q値)  
25      の低下を阻止し得るからである。絶縁体層54の上面は、高さのRMS変

動が例えば25nm以下（好ましくは20nm以下）である。

以上の実施形態において、一層高い音響的品質係数（Q値）を得るには、絶縁体層54や、下方電極61、圧電体層62及び上方電極63の各層における厚さの均一性が一層良好であることが必要である。この厚さの均一性は、上方電極63の表面のうねり高さに反映される（即ち、上方電極63の表面のうねり高さが大きい場合には、少なくとも1つの層の厚さ均一性が低い）。そこで、一層高い音響的品質係数（Q値）を得るために、上方電極63の表面のうねり高さは、圧電体層62の厚さの25%以下となるようにするのが好ましい。また、別の観点からは、上方電極63の表面のうねり高さは、測定長の0.5%以下となるようにする（測定長が150μmの場合には、うねり高さ0.75μm以下）のが好ましい。

以上の実施形態は、FBARに関するものである。しかし、当業者には、以上の説明から、同様なプロセスを用いてSBARを作製することが可能であることが明らかであろう。SBARの場合には、もう一つの圧電体層（第2の圧電体層）およびその上の電極（第2の上方電極）を堆積しなければならない。第2の圧電体層は上記実施形態で示されているような「FBAR」の上方電極の上に形成されているから、この上方電極の厚さをも150nm以下に維持して第2の圧電体層を堆積するための適切な表面（第1の圧電体層の下方電極の表面と同様）を与えなければならない。

図11は、本発明による音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの更に別の実施形態を説明するための模式的断面図であり、図12はその上方電極の平面図である。この実施形態では、上方電極63の形状のみ、上記図3～8に関し説明した実施形態と異なる。

本実施形態では、上方電極63が中央部631と該中央部の周囲に枠状に位置し且つ中央部631より肉厚の外周部632とを有する。中央部631と外周部632との境界は段差により形成されている。

外周部632の厚さは、中央部631の厚さの1.1倍以上であるのが

好ましい。また、中央部631の厚変動は、該中央部の厚さ（平均値）の1%以下であるのが好ましい。上方電極63の寸法aは、例えば100 $\mu$ mである。外周部632は上方電極63の外縁から距離bまでの範囲内に位置しており、距離bは例えば40 $\mu$ mまでの値である。

- 5      このような上方電極構造とすることで、上方電極外周部での横方向の振動発生を抑制し、音響共振器の振動に余分なスプリアス振動が重なることを防止することができる。その結果、音響共振器およびフィルタの共振特性や品質係数が改善される。

- 10      本実施形態では、一層高い音響的品質係数（Q値）を得るために、上方電極63の中央部631の表面のうねり高さは、圧電体層62の厚さの25%以下となるようにするのが好ましい。また、別の観点からは、上方電極63の中央部631の表面のうねり高さは、測定長の0.5%以下となるようにするのが好ましい。

- 15      本発明の上述の実施形態では、PSGから構成された犠牲層を利用して、犠牲層には他の材料をも使用することができる。たとえば、BP SG（Boron-Phosphor-Silicate-Glass：ボロン-燐-シリコン-ガラス）または、スピンのような他の形態のガラスを利用することもできる。これ以外にも、スピニングにより材料上に堆積できるポリビニール、ポリプロピレン、およびポリスチレンの  
20      ような、プラスチックがある。堆積したこれら材料の表面は原子的レベルからみて滑らかでないので、これら材料から犠牲層を構成する場合にも、PSG犠牲層の場合のように、研磨による表面平滑化が重要である。これらの犠牲層は、有機除去材あるいはO<sub>2</sub>プラズマエッチングによって取り  
25      去ることもできる。

- 25      次に、図13および図14は、それぞれ、本発明による薄膜音響共振器であるFBARおよびSBARの断面図である。

- 30      図13において、FBAR20は、上方電極層21、下方電極層23及び密着電極層24を備え、これらは圧電体薄膜層22の一部を挟み込んで挟み込み構造体を形成している。圧電体薄膜層22の好適な材料は窒化アルミニウム（AlN）または酸化亜鉛（ZnO）である。FBAR20に

使用される密着電極層24は、好適にはTi、Cr、Ni、Taから作られるが、他の材料を使用することも可能である。上方及び下方の電極層21、23は、好適にはAu、Pt、W、Moから作られるが、他の材料を使用することも可能である。挟み込み構造体は、基板11の上面に形成された窪み12の周囲において該基板11上に密着電極層24が位置するようにして、配置されている。

この素子は、圧電体薄膜層内のバルク弾性音響波の作用を利用している。印加電圧により二つの電極21、23の間に電界が生ずると、圧電体薄膜は電気エネルギーの一部を音波の形の機械的エネルギーに変換する。音波は電界と同じ方向に伝播し、電極/空気境界面で反射される。

機械的に共振している時、PZ材料の電気エネルギー/機械エネルギー変換機能により、音響共振器は電気共振器としての役割を果たす。したがって、素子は、ノッチフィルタとして動作することができる。素子の機械的共振は、音波が伝播する材料の厚さが当該音波の半波長と等しくなる周波数において発生する。音波の周波数は電極21、23間に印加される電気信号の周波数である。音波の速度は光の速度より5~6桁小さいから、得られる共振器を極めてコンパクトにすることができる。GHz帯の用途に対する共振器を、平面寸法が約100 $\mu$ m、厚さが数 $\mu$ mのオーダーの寸法で構成することができる。

次に、図14を参照してSBARについて説明する。SBAR40は、帯域フィルタと類似の電氣的機能を与える。SBAR40は、基本的には機械的に結合されている二つのFBARフィルタである。圧電体薄膜層42の共振周波数で密着電極層24及び下方電極層45と電極層44とを横断する信号は、音響エネルギーを圧電体薄膜層41に伝える。圧電体薄膜層41内の機械的振動は、電極層44と電極層43とを横断する電気信号に変換される。

図15~図21は、本発明による薄膜音響共振器であるFBARの製造方法及びそれにより得られたFBARの実施形態を説明するための模式的断面図(図15~図20)及び模式的平面図(図21)である。

30  まず、図15に示されているように、集積回路製作に利用されている通

常のシリコンウェーハ51に、エッチングにより窪みを形成する。窪みの深さは好適には1.5~30 $\mu$ m、更に好ましくは1.5~10 $\mu$ mあるいは場合によっては3~30 $\mu$ mである。FBARの挟み込み構造体の下の空洞の深さは圧電体薄膜層により生ずる変位を許容すればよい。したがって、空洞の深さは数 $\mu$ mあれば十分である。

ウェーハ51の表面に熱酸化により酸化シリコンの薄層53を形成し、これにより、その上に以後の工程で形成される犠牲層のPSGからウェーハ51内に磷が拡散しないようにする。この薄層53としては、酸化シリコン層の代わりに、低圧CVD法により形成した窒化シリコン層を用いてもよい。このようにウェーハ51内への磷の拡散を抑制することにより、シリコンウェーハが導体に変換されることが阻止され、作製された素子の電氣的動作に対する悪影響をなくすることができる。以上のようにしてウェーハ51の表面に酸化シリコンまたは窒化シリコンの薄層53を形成したものを、基板として用いる。即ち、図15は、基板の表面に深さが好適には1.5~30 $\mu$ m、更に好ましくは1.5~10 $\mu$ mあるいは場合によっては3~30 $\mu$ mの窪み52を形成した状態を示す。

次に、図16に示されているように、基板上に窪み52を取り囲むようにして密着電極層161を接合形成する。密着電極層161の上面の面積(平面面積)を $S_1$ とし、その上に形成する下方電極の平面面積を $S_2$ としたとき、 $S_1$ が $0.01 \times S_2 \leq S_1 \leq 0.5 \times S_2$ の範囲内にあることが好ましい。 $S_1 < 0.01 \times S_2$ の場合には、基板と下方電極との密着力が弱くなり、本発明の効果が十分に発現しなくなる傾向にある。また、 $S_1 > 0.5 \times S_2$ の場合には、密着電極層161が薄膜音響共振器の動作に影響を与え、良好な共振特性が得られなくなる傾向にある。密着電極層161の厚さは、その上に形成する下方電極層を保持するに十分なものであれば良く、例えば20nmから1 $\mu$ mまでの範囲内であれば良い。また、密着電極層161の材料は、好適には、Ti、Cr、Ni、Taより選ばれる少なくとも一種を含みさえすれば良い。

以上のように密着電極層161を基板の窪み52の周囲に設けることで、薄膜音響共振器における横方向の振動発生を抑制し、薄膜音響共振器

の振動に余分なスプリアス振動が重なることを防止することができる。その結果、薄膜音響共振器およびフィルタの共振特性、品質係数が改善される。また、Au、Pt、W、Moなどからなる下方電極層の中央部の下側には、Ti、Cr、Ni、Taなどからなる密着電極層161が存在しないため、この部分では下方電極層の配向性及び結晶性を高めることができ、その結果、ロッキングカーブにおける回折ピーク半値幅(FWHM)が小さく、配向性及び結晶品質に優れた圧電体薄膜層を形成できることが見出された。圧電体薄膜層の高配向性及び良質結晶化により、本発明の薄膜音響共振器およびフィルタの共振特性及び品質係数が改善される。

さて、次に、図17に示されているように、密着電極層161の形成された基板の酸化シリコンまたは窒化シリコンの薄層53上にPSGからなる犠牲層55を堆積させる。上記のように、PSGは、シランおよび $P_2O_5$ 源となる物質を原料として約450℃までの温度で堆積され、燐含有量約8%の軟ガラス様物質を形成する。シランの例としては、モノシラン(Monosilane:  $SiH_4$ )、トリクロルシラン(Trichlorosilane:  $SiHCl_3$ )、テトラメトキシシラン(Silicon tetramethoxide:  $Si(OCH_3)_4$ )、テトラエトキシシラン(Silicon tetraethoxide:  $Si(OC_2H_5)_4$ )などが挙げられる。 $P_2O_5$ 源となる物質の例としては、 $P_2O_5$ の他に、ホスフィン( $PH_3$ )、亜リン酸トリメチル(Trimethyl phosphite:  $P(OCH_3)_3$ )、亜リン酸トリエチル(Triethyl phosphite:  $P(OC_2H_5)_3$ )、リン酸トリメチル(Trimethyl phosphate:  $PO(OCH_3)_3$ )、リン酸トリエチル(Triethyl phosphate:  $PO(OC_2H_5)_3$ )などが挙げられる。この低温プロセスは、当業者に周知である。PSGは、比較的低温で堆積させることができ、且つ、希釈 $H_2O:Hf$ 溶液で非常に高いエッチング速度でエッチングされる非常にクリーンな不活性材料であるから、犠牲層の材料として好適である。以後の工程で実行されるエッチングにおいて10:1の希釈割合で毎分約3 $\mu m$ のエッチング速度が得られる。

堆積したままのPSG犠牲層55の表面は、原子レベルでみると非常に粗い。従って、堆積したままのPSG犠牲層55は、薄膜音響共振器を形成する基体としては不十分である。FBAR/SBAR形式の薄膜音響共振器は、結晶が電極面に垂直な柱状晶を成して成長する圧電体材料を必要とする。微細な研磨粒子を含む研磨スラリーを用いてPSG犠牲層55の表面を磨いて滑らかにすることにより、優れた配向性及び結晶品質を持つ下方電極層の形成が可能となり、ひいては優れた配向性及び結晶品質を持つ圧電体薄膜層の形成が可能となる。

即ち、図18に示されているように、PSG犠牲層55の表面を粗仕上げスラリーで磨くことにより平面化して、密着電極層161の上に堆積したPSG層の部分除去する。次に、残っているPSG層55を更に微細な研磨粒子を含む精密仕上げスラリーを使用して磨くことができる。代替方法として、磨き時間が長くかかっても良ければ、一つの微細な精密仕上げスラリーを二つの磨きステップにて使用することもできる。目標は、「ミラー」状仕上げ（鏡面仕上げ）を実現することである。

本発明においては、PSG層を研磨する前に、緻密化とリフローとを兼ねて、PSG層を高温で熱処理することが好ましい。このPSG層の熱処理は、RTA (Rapid Thermal Anneal) 法により行なうことができる。これは、窒素雰囲気中または窒素-酸素混合雰囲気中で750℃～950℃の温度で行なわれる。または、高温熱処理を拡散炉またはランプ加熱により行なってもよい。本発明においては、PSG層を高温で熱処理することにより、PSG層をより緻密な構造にするとともに、その硬度を高める。硬度を高めることにより、その後のCMP（化学的機械的研磨）において、PSG膜表面にスクラッチ等の研磨傷が発生するのを抑制し、表面を良好に平坦化することができる。

以上のようにして実行された研磨の後の基板のクリーニングも重要である。スラリーは基板上に少量のシリカ粗粉を残すので、この粗粉を除去せねばならない。本発明の好適な実施形態では、このシリカ粗粉の除去をポリテックス (Polytex (商標) : ロデール・ニッタ社) のような堅いパッドの付いた第2の研磨具を使用して行う。その際の潤滑剤として、



脱イオン水を使用し、磨いてから最終クリーニングステップの準備が完了するまで基板を脱イオン水中に入れておく。基板を、最後の磨きステップと最後のクリーニングステップとの間で乾燥させないように注意する。最後のクリーニングステップは、基板を色々な化学薬品の入っている一連の  
5 タンクに漬けることから成る。各タンクでは超音波攪拌が加えられる。このようなクリーニング手段は当業者には周知である。

研磨剤は、シリカ微粒子から構成されている。本発明の好適な実施形態では、シリカ微粒子のアンモニア主体スラリー（Rodel Klebo  
s o 1 # 3 0 N : ローデル・ニッタ社）を利用する。

10 以上の説明では特定の研磨およびクリーニングの様式を示したが、必要な滑らかさの表面を与えるどんな研磨およびクリーニングの様式をも利用することができる。本発明の好適な実施形態では、最終表面は、原子間力顕微鏡プローブで測った高さのRMS変動が25nm以下、好ましくは20nm以下、更に好ましくは10nm以下の表面粗度である。

15 以上のようにして表面を平滑にし、さらに密着電極層161の表面をプラズマエッチングにより清浄化処理した後、図19に示されているように、挟み込み構造体60の下方電極層162を堆積させる。下方電極層162の好適な材料は、Au、Pt、W、Moである。この下方電極層162の配向性及び結晶性が、その上に形成される圧電体薄膜層163の配向  
20 性及び結晶品質に反映される。

下方電極層162の厚さも重要である。厚い層は、薄い層より表面が粗くなる。上記のように、圧電体薄膜層163の堆積のための滑らかな表面を維持することは、得られる共振器の性能にとって非常に重要である。したがって、下方電極層162の厚さは、好適には200nm未満である。  
25 Au、Pt、W、Moは好適にはスパッタリングにより堆積される。この方法により、表面の高さのRMS変動が25nm以下、好ましくは20nm以下、更に好ましくは10nm以下の表面粗度の下方電極層162が得られる。

下方電極層162を堆積し終わってから、下方電極層162の周囲に  
30 残ったPSG犠牲層を除去し、圧電体薄膜層163を堆積する。圧電体薄

膜層163の好適な材料は、AlNまたはZnOであり、これもスパッタリングにより堆積される。本発明の好適な実施形態では、圧電体薄膜層163の厚さは、0.1  $\mu\text{m}$ から10  $\mu\text{m}$ の間、好ましくは0.5  $\mu\text{m}$ から2  $\mu\text{m}$ の間にある。

- 5      最後に、上方電極層164を堆積させる。上方電極層164は、下方電極層162と同様な材料から構成され、好適にはAu、Pt、W、Moから構成される。

10      以上のようにして、密着電極層161、下方電極層162、圧電体薄膜層163及び上方電極層164の接合されたものからなり所要の形状にパターニングされた挟み込み構造体60を形成してから、RIE（反応性イオンエッチング）などの乾式エッチング法により、上方電極層164の周辺部から下方へ向かって、該上方電極層164、圧電体薄膜層163及び下方電極層162を通して犠牲層55にまで到達するような貫通小孔を開け、希釈H<sub>2</sub>O：HF溶液でエッチングすることにより、挟み込み構造体  
15      60の下方のPSGを除去する。これにより、図20及び図21に示されているように、窪み52の上に橋架けされた挟み込み構造体60が残る。即ち、挟み込み構造体60は、基板の表面に形成された窪み52の周囲に密着電極層161が位置し、窪み52をまたぐようにして、縁部が基板により支持されている。

20      以上のようにして得られた薄膜音響共振器においては、挟み込み構造体60の周辺部では密着電極層161の分だけ質量が大きくなるので、横方向の振動発生が抑制され、薄膜音響共振器の振動に余分なスプリアス振動の重なりが生ずるのを防止することができる。また、窪み52の周囲に密着電極層161を形成することにより、従来空洞上に単独では堆積できなかったAu、Ptなどからなる下方電極層を堆積することが可能となり、  
25      W、Moなどからなる下方電極層についても下地基板との密着性が改善される。

30      また、以上のような薄膜音響共振器の製造方法によれば、Au、Pt、W、Moなどからなる下方電極層162の中央部をシリカガラス、磷酸石英ガラスなどのガラス質の犠牲層上に形成するので、従来のTi等からな

る密着層上にAu、Pt、W、Moなどの電極層を全体的に形成する場合よりも、下方電極層の配向性及び結晶性が優れたものとなり、ロッキングカーブにおける回折ピーク半値幅(FWHM)の小さな良質な結晶膜が得られる。このようにして下方電極層162の配向性及び結晶品質を改良することにより、その上に形成される圧電体薄膜層の配向性及び結晶品質の向上が実現される。

5 以上の実施形態は、FBARに関するものである。しかし、当業者には、以上の説明から、同様なプロセスを用いてSBARを作製することが可能であることが明らかであろう。SBARの場合には、もう一つの圧電体層(第2の圧電体層)およびその上の電極層を堆積しなければならない。第2の圧電体層は上記実施形態で示されているような「FBAR」の上方電極層の上に形成されているから、この上方電極層の厚さをも例えば100nmに維持して第2の圧電体層を堆積するための適切な表面状態を与えるようにする。例えば、高さのRMS変動が25nm以下、好ましくは20nm以下、更に好ましくは1.0nm以下の表面粗度である平滑な表面とするのが好ましい。

10 本発明の上述の実施形態では、PSGから構成された犠牲層を利用しているが、犠牲層には他の材料をも使用することができる。例えば、BPSG(Boron-Phosphor-silicate-Glass: ボロン-燐-シリコン-ガラス)または、スピン・ガラスのような他の形態のガラスを利用することもできる。これ以外にも、スピニングにより基板上に堆積できるポリビニール、ポリプロピレン、およびポリスチレンのようなプラスチックがある。これらの材料から犠牲層を構成する場合にも、PSG犠牲層の場合のように、研磨による表面平滑化が重要である。これら

15 20 25 30

の犠牲層は、有機除去材あるいはO<sub>2</sub>プラズマエッチングによって取り去ることもできる。

次に、図22は本発明による圧電薄膜共振子(薄膜音響共振器)の実施形態を示す模式的平面図であり、図23はそのX-X断面図である。これらの図において、圧電薄膜共振子111は基板112、該基板112の表面上に形成された絶縁層13及び該絶縁層13の上面上に接合された圧電

積層構造体14を有する。圧電積層構造体14は、絶縁層13の上面上に形成された下部電極15、該下部電極15の一部を覆うようにして下地膜13の上面上に形成された圧電体膜16および該圧電体膜16の上面上に形成された上部電極17からなる。基板112には、空隙を形成するビアホール120が形成されている。絶縁層13の一部はビアホール120に向けて露出している。この絶縁層13の露出部分、及びこれに対応する圧電積層構造体14の部分が振動部（振動ダイヤフラム）121を構成する。また、下部電極15及び上部電極17は、振動部121に対応する領域内に形成された主体部15a、17aと、該主体部15a、17aと外部回路との接続のための端子部15b、17bを有する。端子部15b、17bは振動部121に対応する領域外に位置する。

基板112としては、Si(100)単結晶などの単結晶、または、Si単結晶などの基材の表面にシリコン、ダイヤモンドその他の多結晶膜を形成したものをを用いることができる。基板112のビアホール120の形成方法としては、基板下面側からの異方性エッチング法が例示される。尚、基板112に形成される空隙は、ビアホール120によるものには限定されず、振動部121の振動を許容するものであればよく、該振動部121に対応する基板上面領域に形成した凹部であってもよい。

絶縁層13は、酸化シリコン(SiO<sub>2</sub>)または窒化シリコン(SiN<sub>x</sub>)を主成分とする(好ましくは含有量が50当量%以上の)誘電体膜である。誘電体膜は、単層からなるものであってもよいし、密着性を高めるための層などを付加した複数層からなるものであってもよい。複数層からなる誘電体膜の例としては、SiO<sub>2</sub>層の片面または両面に窒化シリコン層を付加したものが例示される。絶縁層13の厚さは、例えば0.2〜2.0μmである。絶縁層13の形成方法としては、シリコンからなる基板112の表面の熱酸化法やCVD法や低圧CVD法が例示される。

下部電極15及び上部電極17は、モリブデン(Mo)を主成分とする(好ましくは含有量が80当量%以上の)導電膜である。Moは熱弾性損失が低い(A1の約1/56)ことから、特に高周波で振動する振動部を構成するのに好適である。Mo単体だけでなく、Moを主成分とする合金

を使用することも可能である。下部電極15及び上部電極17の厚さは、例えば50～200nmである。下部電極15及び上部電極17の形成方法としては、スパッタ法または蒸着法が例示され、更に必要に応じて所要の形状へのパターニングのためにフォトリソグラフィ技術が用いられる。

圧電体膜16は、AlNを主成分とする（好ましくは含有量が90当量%以上の）圧電膜からなり、その厚さは例えば0.5～2.5μmである。圧電体膜16の形成方法としては、反応性スパッタ法が例示され、更に必要に応じて所要の形状へのパターニングのためにフォトリソグラフィ技術が用いられる。

本発明者らは、図22及び図23に示す構成でAlNを主成分とする圧電体膜16を持ち2GHz近傍に基本モードの共振を持つFBARについて、弾性波の伝搬速度が速いというAlN薄膜の特長を活かしつつ、電気機械結合係数及び音響的品質係数を損なうことなく共振周波数の温度安定性を高めるべく、鋭意検討した結果、絶縁層13としてSiO<sub>2</sub>またはSiN<sub>x</sub>を主成分とするものを用い且つ上下部電極15、17としてMoを主成分とするものを用いることが有効であることを見出した。更に、圧電体膜16の厚さ $t$ と絶縁層13の厚さ $t'$ とが $0.1 \leq t'/t \leq 0.5$ 好ましくは $0.2 \leq t'/t \leq 0.4$ を満たすことにより、電気機械結合係数、音響的品質係数及び共振周波数の温度安定性の全てが一層良好となることを見出した。 $t'/t < 0.1$ となると、電気機械結合係数及び音響的品質係数は若干向上する場合があるものの、共振周波数の温度係数の絶対値が大きくなり、FBARとしての特性が低下する傾向にある。また、 $t'/t > 0.5$ となると、電気機械結合係数及び音響的品質係数が低下し、共振周波数の温度係数の絶対値が大きくなり、FBARとしての特性が低下する傾向にある。

図24は本発明による圧電薄膜共振子の更に別の実施形態を示す模式的平面図であり、図25はそのX-X断面図である。これらの図において、上記図22及び図23におけると同様の機能を有する部材には同一の符号が付されている。

本実施形態では、絶縁層13の他にも、 $\text{SiO}_2$  または  $\text{SiN}_x$  を主成分とする（好ましくは含有量が50当量%以上の）絶縁層18が圧電積層構造体14に接合されている。絶縁層18は上部電極17の主体部17a上に形成されている。絶縁層18は、振動部121に対応する領域以外に  
5 延びて、圧電体膜16上にて広い範囲にわたって形成されていてもよい。  
さらに、酸化シリコンまたは窒化シリコンを主成分とする絶縁層18が形成される場合には、絶縁層13を省略することもできる。但し、この場合、下部電極15の主体部15aを基板112の上面におけるビアホール120の矩形状開口の2辺を通して該開口内へと延出させ、下部電極15  
10 による振動部121の保持を行うことが好ましい。

図24、25の実施形態においても、図22、23の実施形態と同様の効果が得られる。

図26は本発明による圧電薄膜共振子の更に別の実施形態を示す模式的平面図であり、図27はそのX-X断面図である。これらの図において、  
15 上記図22～図25におけると同様の機能を有する部材には同一の符号が付されている。

本実施形態では、下部電極15は矩形状をなしており、上部電極17は、第1の電極部17Aと第2の電極部17Bとからなる。これら電極部17A、17Bはそれぞれ主体部17Aa、17Baと端子部17Ab、  
20 17Bbとを有する。主体部17Aa、17Baは振動部121に対応する領域内に位置しており、端子部17Ab、17Bbは振動部121に対応する領域外に位置している。

図28は本発明による圧電薄膜共振子の更に別の実施形態を示す模式的平面図であり、図29はそのX-X断面図である。これらの図において、  
25 上記図22～図27におけると同様の機能を有する部材には同一の符号が付されている。

本実施形態では、下部電極15は矩形状をなしており、上部電極17は、第1の電極部17Aと第2の電極部17Bとからなる。これら電極部17A、17Bはそれぞれ主体部17Aa、17Baと端子部17Ab、  
30 17Bbとを有する。主体部17Aa、17Baは振動部121に対応す

る領域内に位置しており、端子部17Ab, 17Bbは振動部121に対応する領域外に位置している。本実施形態では、絶縁層18は第1電極部の主体部17Aa及び第2電極部の主体部17Baの双方を覆うように形成されている。

- 5 図26, 27の実施形態及び図28, 29の実施形態においても、図22, 23の実施形態及び図24, 25の実施形態と同様の効果が得られる。また、図26, 27及び図28, 29の実施形態は、多重モード共振子と呼ばれるものであり、上部電極17のうち的一方（例えば第2の電極部17B）と下部電極15との間に入力電圧を印加し、上部電極17のう  
10 ちの他方（例えば第1の電極部17A）と下部電極15との間の電圧を出力電圧として取り出すことができる。

以上のような圧電薄膜共振子において、マイクロ波プローバを使用して測定したインピーダンス特性における共振周波数 $f_r$  および反共振周波数 $f_a$  と電気機械結合係数 $k_t^2$ との間には、以下の関係

15 
$$k_t^2 = \phi_r / \tan(\phi_r)$$
$$\phi_r = (\pi/2) \cdot (f_r / f_a)$$

がある。

簡単のため、電気機械結合係数 $k_t^2$ として、次式

$$k_t^2 = 4.8 (f_a - f_r) / (f_a + f_r)$$

- 20 から算出したものを用いることができ、本明細書では、電気機械結合係数 $k_t^2$ の数値は、この式を用いて算出したものを用いている。

図22, 23、図24, 25、図26, 27及び図28, 29に示した構成のFBARにおいて、2.0GHz近傍における共振周波数及び反共振周波数の測定値から求めた電気機械結合係数 $k_t^2$ は4.0～6.5%である。電気機械結合係数 $k_t^2$ が4.0%未満になると、作製したFBAR  
25 の帯域幅が小さくなり、高周波域で実用に供することが難しくなる傾向にある。

以下、実施例により本発明を更に詳細に説明する。

#### [実施例1]

- 30 図3～図8に記載されているようにして、薄膜音響共振器を作製し

た。

5  まず、Siウェーハ51の表面をPt/Ti保護膜により被覆し、エッチングにより該保護膜を窪み形成のための所定のパターン状に形成して、Siウェーハ51のエッチングのためのマスクを形成した。その後、Pt/Tiパターンマスクを用いて湿式エッチングを行い、図3に示されているように、深さ20 $\mu$ mで幅150 $\mu$ mの窪みを形成した。このエッチングは、5重量%のKOH水溶液を用い、液温70℃で実施した。なお、窪みの深さを3 $\mu$ mとしてもよい。

10  その後、Pt/Tiパターンマスクを除去し、図3に示されているように、熱酸化によりSiウェーハ51の表面に厚さ1 $\mu$ mのSiO<sub>2</sub>層53を形成し、Siウェーハ51及びSiO<sub>2</sub>層53からなる基板上に窪み52の形成されている構造を得た。

15  次いで、図4に示されるように、窪み52の形成されているSiO<sub>2</sub>層53上に、厚さ30 $\mu$ mのPSG犠牲層55を堆積させた。この堆積は、450℃でシラン及びP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を原料として用いた熱CVD法により行った。なお、PSG犠牲層55の厚さを5 $\mu$ mとしてもよく、熱CVD法における原料としてシラン及びリン酸トリメチル(P(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>)を用いてもよく、更に、堆積したPSG層を1%酸素/窒素混合雰囲気中で850℃にて20分間熱処理してリフローさせ硬度を高めてもよい。

20  次いで、図5に示されているようにして、PSG犠牲層55の表面を研磨し、窪み52以外の領域のPSG犠牲層55を除去した。続いて、窪み52内に残留するPSG犠牲層55の表面を微細な研磨粒子を含むスラリーを用いて研磨し、その表面粗さを高さのRMS変動が10nmとなるようにした。

25  次いで、図6に示されているように、PSG犠牲層55上に厚さ100nmで寸法200×200 $\mu$ mのMo膜からなる下部電極61を形成した。Mo膜の形成は、スパッタガスとしてArを用い、室温でDCマグネトロンスパッタ法により行った。そして、リフトオフ法によりMo膜のパターニングを行った。形成されたMo膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は15nmであった。

30



次いで、下部電極61上にZnO膜からなる1.0 $\mu$ m厚の圧電体層62を形成した。ZnO膜の形成は、スパッタリングターゲットとしてZnOを用い、スパッタガスとしてArとO<sub>2</sub>との混合ガスを用い、スパッタガス圧を5mTorrとし、基板温度400℃でRFマグネトロンスパッタ法により行った。形成されたZnO膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は膜厚の5%以下の11nmであった。湿式エッチングによりZnO膜を所定形状にパターニングして圧電体層62を得た。

次いで、圧電体層62上に、厚さ100nmのMo膜からなる上部電極63を形成した。Mo膜の形成及びパターニングは、下部電極61の形成の際と同様にした。上部電極63の表面について、測定長さ150 $\mu$ mでうねり高さを調べたところ、圧電体層62の膜厚の25%以下で且つ測定長の0.5%以下の0.2 $\mu$ mであった。

次いで、希釈H<sub>2</sub>O:HF溶液でエッチングすることによりPSG犠牲層55を除去した。これにより、図8に示されているように、窪み52の上にMo/ZnO/Moの挟み込み構造体60が橋架けされた形態を形成した。

得られた圧電体層62の薄膜XRD分析を行ったところ、膜のc軸は膜面に対して88.5度の方向であり、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は2.5度であり、良好な配向性を示していた。

以上のようにして得られた音響共振器について、マイクロ波プローバを使用して上部電極63と下部電極61との間のインピーダンス特性を測定するとともに、共振周波数 $f_r$ 及び反共振周波数 $f_a$ を測定し、これらの測定値に基づき電気機械結合係数 $k_t^2$ を算出した。電気機械結合係数 $k_t^2$ は5.5%で、音響的品質係数は700であった。実施例1において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

#### 〔比較例1〕

PSG犠牲層55の表面粗さを高さのRMS変動が70nmとなるように研磨を行ったこと以外は、実施例1と同様にして音響共振器を作製した。

下部電極61のMo膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は80nmであった。また、ZnO膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は膜厚の5%を越える75nmであった。上部電極63の表面について、測定長さ150 $\mu$ mでうねり高さを調べたところ、測定長の0.5%を越える1.0 $\mu$ mであった。

得られた圧電体層62の薄膜XRD分析を行ったところ、膜のc軸は膜面に対して85.0度と大きく傾いており、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は7.0度であった。

以上のようにして得られた音響共振器の電気機械結合係数 $k_t^2$ は3.0%で、音響的品质係数は400であった。比較例1において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

#### [実施例2]

圧電体層62としてZnO膜に代えてAlN膜からなるものを用いたこと以外は、実施例1と同様にして音響共振器を作製した。即ち、下部電極61上にAlN膜からなる1.2 $\mu$ m厚の圧電体層62を形成した。AlN膜の形成は、スパッタリングターゲットとしてAlを用い、スパッタガスとしてArとN<sub>2</sub>との混合ガスを用い、基板温度400℃でRFマグネトロンスパッタ法により行った。形成されたAlN膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は膜厚の5%以下の14nmであった。上部電極63の表面について、測定長さ150 $\mu$ mでうねり高さを調べたところ、圧電体層62の膜厚の25%以下で且つ測定長の0.5%以下の0.2 $\mu$ mであった。

得られた圧電体層62の薄膜XRD分析を行ったところ、膜のc軸は膜面に対して88.5度の方向であり、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は2.8度であり、良好な配向性を示していた。

以上のようにして得られた音響共振器の電気機械結合係数 $k_t^2$ は6.5%で、音響的品质係数は900であった。実施例2において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

30 [比較例2]

PSG犠牲層55の表面粗さを高さのRMS変動が70nmとなるように研磨を行ったこと以外は、実施例2と同様にして音響共振器を作製した。

下部電極61のMo膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は85nmであった。また、AlN膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は膜厚の5%を越える80nmであった。上部電極63の表面について、測定長さ150 $\mu$ mでうねり高さを調べたところ、測定長の0.5%を越える1.25 $\mu$ mであった。

得られた圧電体層62の薄膜XRD分析を行ったところ、膜のc軸は膜面に対して83.0度と大きく傾いており、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は8.5度であった。

以上のようにして得られた音響共振器の電気機械結合係数 $k_t^2$ は3.5%で、音響的品质係数は45.0であった。比較例2において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

#### 15      【実施例3】

図3～図5、図9～図10に記載されているようにして、薄膜音響共振器を作製した。

先ず、実施例1と同様にして、図5に示される構造体を得た。但し、窪み52内に残留するPSG犠牲層55の表面を微細な研磨粒子を含むスラリーを用いて研磨し、その表面粗さを高さのRMS変動が5nmとなるようにした。

次いで、図9に示されているように、PSG犠牲層55の表面をも覆うように基板上にCVD法により厚さ500nmのSiO<sub>2</sub>膜からなる絶縁体層54を形成した。形成された絶縁体層54の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は10nmであった。

次いで、絶縁体層54上に、実施例1と同様にして、図10に示されているように、Mo膜からなる下部電極61を形成した。形成されたMo膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は15nmであった。

次いで、実施例1と同様にして、下部電極61上にZnO膜からなる圧電体層62を形成した。形成されたZnO膜の表面粗さを測定したところ

ろ、高さのRMS変動は膜厚の5%以下の10nmであった。湿式エッチングによりZnO膜を所定形状にパターンニングして圧電体層62を得た。

5 次いで、実施例1と同様にして、圧電体層62上にMo膜からなる上部電極63を形成した。上部電極63の表面について、測定長さ150 $\mu$ mでうねり高さを調べたところ、圧電体層62の膜厚の25%以下で且つ測定長の0.5%以下の0.2 $\mu$ mであった。

10 次いで、絶縁体層54の露出している部分にPSG犠牲層55に達するバイアホールを開口し、該開口を介して希釈H<sub>2</sub>O : HF溶液でエッチングすることによりPSG犠牲層55を除去した。これにより、図10に示されているように、窪み52の上に絶縁体層54とMo/ZnO/Moの挟み込み構造体60との積層体が橋架けされた形態を形成した。

15 得られた圧電体層62の薄膜XRD分析を行ったところ、膜のc軸は膜面に対して88.5度の方向であり、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は2.3度であり、良好な配向性を示していた。

20 以上のようにして得られた音響共振器について、マイクロ波プローバを使用して上部電極63と下部電極61との間のインピーダンス特性を測定するとともに、共振周波数 $f_r$ 及び反共振周波数 $f_a$ を測定し、これらの測定値に基づき電気機械結合係数 $k_t^2$ を算出した。電気機械結合係数 $k_t^2$ は4.5%で、音響的品質係数は650であった。実施例3において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

#### [比較例3]

25 PSG犠牲層55の表面粗さを高さのRMS変動が70nmとなるように研磨を行ったこと以外は、実施例3と同様にして音響共振器を作製した。

30 絶縁体層54のSiO<sub>2</sub>膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は85nmであった。また、下部電極61のMo膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は90nmであった。また、ZnO膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は膜厚の5%を越える85n

mであった。上部電極63の表面について、測定長さ150 $\mu$ mでうねり高さを調べたところ、測定長の0.5%を越える1.0 $\mu$ mであった。

得られた圧電体層62の薄膜XRD分析を行ったところ、膜のc軸は膜面に対して83.0度と大きく傾いており、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は9.5度であった。

以上のようにして得られた音響共振器の電気機械結合係数 $k_t^2$ は2.8%で、音響的品质係数は360であった。比較例3において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

#### 〔実施例4〕

10 上部電極63の形成以外は、実施例2と同様にして音響共振器を作製した。即ち、実施例2と同様にして圧電体層62上に厚さ100nmのMo膜を形成した後に、その外縁から30 $\mu$ mの幅の領域において、更にリフトオフ法により厚さ20nmのMo膜を形成して、図11に示されているような上部電極63を形成した。

15 上部電極63の中央部631の表面について、測定長さ100 $\mu$ mでうねり高さを調べたところ、圧電体層62の膜厚の25%以下で且つ測定長の0.5%以下の0.15 $\mu$ mであった。

以上のようにして得られた音響共振器の電気機械結合係数 $k_t^2$ は7.5%で、音響的品质係数は950であった。実施例4において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

#### 〔実施例5〕

図3～図8に記載されているようにして、薄膜音響共振器を作製した。

25 先ず、Siウェーハ51の表面をSiO<sub>2</sub>保護膜により被覆し、エッチングにより該保護膜を窪み形成のための所定のパターン状に形成して、Siウェーハ51のエッチングのためのマスクを形成した。その後、該マスクを用いて湿式エッチングを行い、図3に示されているように、深さ3 $\mu$ mで幅150 $\mu$ mの窪みを形成した。このエッチングは、実施例1と同様にして実施した。

30 その後、湿式エッチングによりSiO<sub>2</sub>パターンマスクを除去し、図

3に示されているように、Siウェーハ51の表面に厚さ200nmのSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>層53を形成し、Siウェーハ51及びSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>層53からなる基板上に窪み52の形成されている構造を得た。このSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>層53の堆積は、800℃で、モノシラン(SiH<sub>4</sub>)及びアンモニア(NH<sub>3</sub>)を原料として用いた低圧CVD法により行なった。

次いで、図4に示されているように、窪み52の形成されているSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>層53上に、厚さ5μmのPSG犠牲層55を堆積させた。この堆積は、450℃で、テトラエトキシシラン(Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>)及びリン酸トリメチル(PO(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>)を原料として用いた熱CVD法により行った。更に、堆積したPSG層を1%酸素/窒素混合雰囲気中で850℃にて20分間熱処理してリフローさせて硬度を高めた。

次いで、実施例1と同様にして、図5に示されている構造を得た。但し、研磨粒子の選択により、窪み52内に残留するPSG犠牲層55の表面粗さを高さのRMS変動が5nmとなるようにした。

次いで、実施例1と同様にして、図6に示されているように、Mo膜からなる下部電極61を形成した。形成されたMo膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は13nmであった。

次いで、実施例2と同様にして、下部電極61上にAlN膜からなる1.2μm厚の圧電体層62を形成した。形成されたAlN膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は膜厚の5%以下の10nmであった。

次いで、実施例1と同様にして、圧電体層62上にMo膜からなる上部電極63を形成した。上部電極63の表面について、測定長さ15.0μmでうねり高さを調べたところ、圧電体層62の膜厚の25%以下で且つ測定長の0.5%以下の0.15μmであった。

次いで、実施例1と同様にして、PSG犠牲層55を除去し、これにより、図8に示されているように、窪み52の上にMo/AlN/Moの挟み込み構造体60が橋架けされた形態を形成した。

得られた圧電体層62の薄膜XRD分析を行ったところ、膜のc軸は膜面に対して89.5度の方向であり、ロックングカーブにより配向度を調

べた結果、ピークの半値幅 (FWHM) は2.2度であり、良好な配向性を示していた。

5 以上のようにして得られた音響共振器について、マイクロ波プローバを使用して上部電極63と下部電極61との間のインピーダンス特性を測定するとともに、共振周波数 $f_r$ 及び反共振周波数 $f_a$ を測定し、これらの測定値に基づき電気機械結合係数 $k_t^2$ を算出した。電気機械結合係数 $k_t^2$ は6.7%で、音響的品质係数は980であった。実施例5において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

#### 【実施例6】

10 図3～図5, 図9～図10に記載されているようにして、薄膜音響共振器を作製した。

先ず、実施例5と同様にして、図5に示される構造を得た。但し、研磨粒子の選択により、窪み52内に残留するPSG犠牲層55の表面粗さを高さのRMS変動が10nmとなるようにした。

15 次いで、図9に示されているように、PSG犠牲層55の表面をも覆うように基板上に厚さ500nmの $Si_3N_4$ 膜からなる絶縁体層54を形成した。この $Si_3N_4$ 膜からなる絶縁体層54の堆積は、800℃で、モノシラン ( $SiH_4$ ) 及びアンモニア ( $NH_3$ ) を原料として用いた低圧CVD法により行なった。形成された絶縁体層54の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は12nmであった。

20 次いで、絶縁体層54上に、実施例5と同様にして、図10に示されているように、Mo膜からなる下部電極61を形成した。形成されたMo膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は17nmであった。

25 次いで、実施例5と同様にして、下部電極61上にAlN膜からなる圧電体層62を形成した。形成されたAlN膜の表面粗さを測定したところ、高さのRMS変動は膜厚の5%以下の15nmであった。

30 次いで、実施例5と同様にして、圧電体層62上にMo膜からなる上部電極63を形成した。上部電極63の表面について、測定長さ150 $\mu m$ でうねり高さを調べたところ、圧電体層62の膜厚の25%以下で且つ測定長の0.5%以下の0.21 $\mu m$ であった。

次いで、実施例3と同様に、PSG犠牲層55を除去し、これにより、図10に示されているように、窪み52の上に絶縁体層54とMo/A1N/Moの挟み込み構造体60との積層体が橋架けされた形態を形成した。

- 5 得られた圧電体層62の薄膜XRD分析を行ったところ、膜のc軸は膜面に対して88.4度の方向であり、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅(FWHM)は2.8度であり、良好な配向性を示していた。

- 10 以上のようにして得られた音響共振器について、マイクロ波プローバを使用して上部電極63と下部電極61との間のインピーダンス特性を測定するとともに、共振周波数 $f_r$ 及び反共振周波数 $f_a$ を測定し、これらの測定値に基づき電気機械結合係数 $k_t^2$ を算出した。電気機械結合係数 $k_t^2$ は5.2%で、音響的品质係数は700であった。実施例6において得られたFBARの構成および音響共振器としての特性を表1に示す。

- 15 [実施例7]

図15～図21に記載されているようにして、薄膜音響共振器を作製した。

- 20 まず、Siウェーハ51の表面をSiO<sub>2</sub>保護膜により被覆し、エッチングにより該保護膜を窪み形成のための所定のパターン状に形成し、Siウェーハ51のエッチングのためのマスクを形成した。その後、該マスクを用いて湿式エッチングを行い、図15に示されているように、深さ20μmの窪みを形成した。エッチングは、エッチング液として5wt%のKOH水溶液を用い、液温70℃で行った。なお、窪みの深さを3μmとしてもよい。

- 25 その後、熱酸化により、ウェーハ51の表面に再度SiO<sub>2</sub>層53を形成した。これにより、Siウェーハ51及びSiO<sub>2</sub>層53からなる基板上に窪み52の形成されている構造を得た。

- 30 その後、基板の表面(上面)にCr膜を形成し、該Cr膜のうちの窪み52の周囲を取り囲む部分のみを環状に残すようによりパターンエッチングした。これにより、図16に示されているように、窪み52の周囲を取



り囲むようにCr膜からなる密着電極層161が形成された。Cr膜の形成は、DCマグネトロンスパッタ法を用い、スパッタガスとしてArを用い、基板温度を室温として行った。Cr密着電極層161は、上面の下方電極層との接触面となる平面の面積(S1)が $4500\mu\text{m}^2$ で、膜厚が100nmとなるように形成された。

その後、図17に示されているように、窪み52の形成されているSiO<sub>2</sub>層53及びCr密着電極層61の上に、シランおよびホスフィン(PH<sub>3</sub>)を使用して450℃でPSGを堆積させた。なお、堆積したPSG層を1%酸素/窒素混合雰囲気中で850℃にて20分間熱処理してリフローさせ硬度を高めてもよい。

次いで、図18に示されているように、堆積したPSGの表面を研磨して密着電極層161の上のPSG層の部分除去し、続いてPSG層55の表面を微細な研磨粒子を含むスラリーを用いて研磨し、逆スパッタリング処理によりCr密着電極層161の表面を清浄化した。これにより、PSG犠牲層55の表面は、高さのRMS変動が8nmとなる表面粗さであった。

その後、図19に示されているように、Cr密着電極層161及びPSG犠牲層55の上に、Auからなる下方電極層162を形成した。該下方電極層162のパターニングにはリフトオフ法を採用し、Cr密着電極層161の外周縁に対応する外周縁を有する所定形状の下方電極層162を得た。Au膜の形成は、DCマグネトロンスパッタ法を用い、スパッタガスとしてArを用い、基板温度を室温として行った。下方電極層162は、平面面積(S2)が $2722.5\mu\text{m}^2$ で、膜厚が100nmとなるように形成された。得られたAu膜の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は7nmであった。

次に、下方電極層162の周囲に残ったPSG犠牲層を除去し、下方電極層162上にZnOからなる圧電体薄膜層163を形成した。ZnO膜の形成は、RFマグネトロンスパッタ法を用い、スパッタリングターゲットとしてZnOを用い、スパッタガスとしてAr:O<sub>2</sub>が9:1のAr-O<sub>2</sub>混合ガスを用い、スパッタガス圧を5mTorrとし、基板温度を

400℃として行った。ZnO膜の膜厚は1.0μmであった。得られたZnO膜の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は4nmであった。

5 続いて、ZnO圧電体薄膜層163を湿式エッチングして、結合電極引き出しに必要な開口部以外はCr密着電極層161の外周縁及び下方電極層162の外周縁に対応する外周縁を有する所定形状にパターンニングした。そして、ZnO圧電体薄膜163上にAuからなる上部電極層164を形成した。該上部電極層164は、リフトオフ法によるパターンニングで、外周縁がCr密着電極層161の内周縁より内側となるような所定形状とされた(図21参照)。Au膜の形成は、DCマグネトロンスパッタ法を用い、スパッタガスとしてArを用い、基板温度を室温として行った。Au膜の膜厚は100nmとした。

15 次いで、RIE(反応性イオンエッチング)により、上方電極層164の周辺部から下方へ向かって、該上方電極層164、圧電体薄膜層163及び下方電極層162を通して犠牲層55まで貫通する小さな穴を開け、希釈H<sub>2</sub>O:HF溶液でエッチングすることによりPSG犠牲層55を除去した。これにより、図20に示されているように、窪み52の上にCr/Au/ZnO/Auの挟み込み構造体60が橋架けされた形態を形成した。得られた挟み込み構造体60について、スコッチテープによるピーリングテストを行ったところ、基板との間での剥離は観察されなかった。

20 得られたZnO圧電体薄膜層163について、薄膜XRD分析を行った結果、膜のc軸は膜面内に対して88.6度の方向であり、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、(0002)ピークの半値幅(FWHM)は2.3度であり、良好な配向性を示していた。

25 また、このようにして得られた図20及び図21に示される薄膜音響共振器について、マイクロ波プローバを使用して、上方電極層164と下方電極層162及び密着電極層161との間のインピーダンス特性を測定するとともに、共振周波数 $f_r$ および反共振周波数 $f_a$ を測定し、これらの測定値に基づき電気機械結合係数 $k_t^2$ を算出した。このとき、スプリアス  
30 は励振せず、電気機械結合係数 $k_t^2$ は5.5%で音響的品質係数は1

145であった。実施例7において得られたFBARの構成、密着強度および音響共振器としての特性を表2に示す。

#### [実施例8]

密着電極層161としてCrに代えてTiからなるものを用いたこと以外は、実施例7と同様にして薄膜音響共振器を作製した。Ti膜の形成は、DCマグネトロンスパッタ法を用い、スパッタリングターゲットとしてTiを用い、スパッタガスとしてArを用い、基板温度を室温として行った。Ti膜の膜厚は、20nmとした。得られたZnO圧電体薄膜層163の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は9nmであった。スコッチテープによるピーリングテストを行ったところ、基板と挟み込み構造体60との間での剥離は観察されなかった。また、薄膜XRD分析を行った結果、ZnO圧電体薄膜層163のc軸は膜面内に対して89.2度の方向であり、ロックングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は2.1度と良好な配向性を示していた。

このようにして得られた薄膜音響共振器は、スプリアスの励振はなく、電気機械結合係数 $k_t^2$ は5.9%で、音響的品质係数は772であった。実施例8において得られたFBARの構成、密着強度および音響共振器としての特性を表2に示す。

#### [実施例9]

下方電極層162及び上方電極層164としてAuに代えてPtからなるものを用い且つCr密着電極層161の厚みを60nmとしたこと以外は、実施例7と同様にして薄膜音響共振器を作製した。Pt膜の形成は、DCマグネトロンスパッタ法を用い、スパッタリングターゲットとしてPtを用い、スパッタガスとしてArを用い、基板温度を室温として行った。Pt膜の膜厚は100nmとした。得られたZnO圧電体薄膜層163の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は6nmであった。スコッチテープによるピーリングテストを行ったところ、基板と挟み込み構造体60との間での剥離は観察されなかった。また、薄膜XRD分析を行った結果、ZnO圧電体薄膜層163のc軸は膜面内に対して88.8度の方向であり、ロックングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅

は2.5度と良好な配向性を示していた。

このようにして得られた薄膜音響共振器は、スプリアスの励振はなく、電気機械結合係数 $k_t^2$ は5.2%で、音響的品質係数は898であった。実施例9において得られたFBARの構成、密着強度および音響共振器としての特性を表2に示す。

#### 【実施例10】

密着電極層161としてCrに代えてNiからなるものを用い、その平面面積 $S_1$ を $15000\mu\text{m}^2$ に広げて下方電極層162の平面面積 $S_2$ との比率 $S_1/S_2$ を0.55にしたこと以外は、実施例7と同様にして薄膜音響共振器を作製した。Ni膜の形成は、DCマグネトロンスパッタ法を用い、スパッタリングターゲットとしてNiを用い、スパッタガスとしてArを用い、基板温度を室温として行った。Ni膜の膜厚は50nmとした。得られたZnO圧電体薄膜層163の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は11nmであった。スコッチテープによるピーリングテストを行ったところ、基板と挟み込み構造体60との間での剥離は観察されなかった。また、薄膜XRD分析を行った結果、ZnO圧電体薄膜層163のc軸は膜面内に対して89.0度の方向であり、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は2.9度と良好な配向性を示していた。

このようにして得られた薄膜音響共振器は、スプリアスの励振はなく、電気機械結合係数 $k_t^2$ は4.8%で、音響的品質係数は707であった。実施例10において得られたFBARの構成、密着強度および音響共振器としての特性を表2に示す。

#### 【実施例11】

上方及び下方の電極層162, 164としてAuに代えてPtからなるものを用い、圧電薄膜層163としてZnOに代えてAlNからなるものを用い、且つTi密着電極層161の平面面積 $S_1$ を $4000\mu\text{m}^2$ とし厚みを30nmとしたこと以外は、実施例8と同様にして薄膜音響共振器を作製した。Pt膜の形成は、実施例9と同様に行った。また、AlN膜の形成は、RFマグネトロンスパッタ法を用い、スパッタリングターゲット

トとしてAlを用い、スパッタガスとしてAr : N<sub>2</sub> が1 : 1のAr - N<sub>2</sub> 混合ガスを用い、基板温度を400℃として行った。AlN膜の膜厚は1.4 μmとした。得られたAlN膜の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は7 nmであった。スコッチテープによるピーリングテストを行なったところ、基板と挟み込み構造体60との間での剥離は観察されな  
5 かった。また、薄膜XRD分析を行った結果、AlN圧電体薄膜層163のc軸は膜面内に対して90.0度の方向であり、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は2.7度と良好な配向性を示していた。

10 このようにして得られた薄膜音響共振器は、スプリアスの励振はなく、電気機械結合係数 $k_t^2$ は6.4%で、音響的品質係数は984であった。実施例1.1において得られたFBARの構成、密着強度および音響共振器としての特性を表2に示す。

#### [実施例1.2]

15 密着電極層161としてCrからなるものを用い、上方及び下方の電極層162, 164としてMoからなるものを用い、且つCr密着電極層161の平面面積S1を5000 μm<sup>2</sup>とし厚みを40 nmとしたこと以外は、実施例1.1と同様にして薄膜音響共振器を作製した。得られたAlN膜の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は5 nmであった。スコ  
20 ャテープによるピーリングテストを行なったところ、基板と挟み込み構造体60との間での剥離は観察されなかった。また、薄膜XRD分析を行った結果、AlN圧電体薄膜層163のc軸は膜面内に対して89.8度の方向であり、ロッキングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は2.9度と良好な配向性を示していた。

25 このようにして得られた薄膜音響共振器は、スプリアスの励振はなく、電気機械結合係数 $k_t^2$ は6.1%で、音響的品質係数は1140であった。実施例1.2において得られたFBARの構成、密着強度および音響共振器としての特性を表2に示す。

#### [比較例4]

30 Siウェーハ51及びSiO<sub>2</sub>層53からなる基板上に窪み52の形成

されている構造の上にPSGを堆積させ、その表面を研磨して窪み52以外の領域のPSG層の部分を除き、窪み52の領域のPSG層の表面を高さのRMS変動が38nmとなるような表面粗さにし、その上にCr膜及びAu膜を形成し、これらの膜を同一形状にパターンニングして、密着電極層161を下方電極層162の全面に接合した形態を得たこと以外は、実施例7と同様にして薄膜音響共振器を作製した。得られたZnO膜の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は30nmであった。スコッチテープによるピーリングテストを行ったところ、基板と挟み込み構造体60との間での剥離は観察されなかった。また、薄膜XRD分析を行った結果、ZnO圧電体薄膜層163のc軸は膜面内に対して87.5度の方向であり、ロックングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は4.8度と実施例7に比べて2.5度ほどの劣化を示した。

また、このようにして得られた薄膜音響共振器は、スプリアスが励振し、電気機械結合係数 $k_t^2$ は2.5%で、音響的品質係数は404であった。比較例4において得られたFBARの構成、密着強度および音響共振器としての特性を表2に示す。

#### [比較例5]

密着電極層161を設けなかったこと以外は、比較例4と同様にして薄膜音響共振器を作製した。但し、窪み52の領域のPSG層の表面を高さのRMS変動が33nmとなるような表面粗さにした。得られたZnO膜の表面粗さを調べた結果、高さのRMS変動は23nmであった。薄膜XRD分析を行った結果、ZnO圧電体薄膜層163のc軸は膜面内に対して88.4度の方向であり、ロックングカーブにより配向度を調べた結果、ピークの半値幅は4.2度であり、スコッチテープによるピーリングテストにおいて、基板と挟み込み構造体60との間での剥離が観察された。

また、このようにして得られた薄膜音響共振器は、スプリアスが励振し、電気機械結合係数 $k_t^2$ は3.2で、音響的品質係数は446であった。比較例5において得られたFBARの構成、密着強度および音響共振器としての特性を表2に示す。

## 【実施例 13～15】

本実施例では、以下のようにして、図 22, 23 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。

5 即ち、厚さ  $25.0\ \mu\text{m}$  の (100) Si 基板 112 の上面及び下面に、熱酸化法により厚さ  $0.3\sim 0.6\ \mu\text{m}$  の酸化シリコン ( $\text{SiO}_2$ ) 層を形成した。上面側の  $\text{SiO}_2$  層を絶縁層 13 とした。また、下面側の  $\text{SiO}_2$  層は基板 112 に対する後述のビアホール形成のためのマスクのパターンに形成した。

10 絶縁層 13 の表面に、DC マグネトロンスパッタ法により厚さ  $0.1\ \mu\text{m}$  の Mo 層を形成し、フォトリソグラフィーによりパターン化して下部電極 15 を形成した。下部電極 15 の主体部 15a は平面寸法  $140\times 160\ \mu\text{m}$  の矩形に近い形状とした。この Mo 下部電極 15 上に、結晶面が C 軸に配向した厚さ  $1.3\sim 2.0\ \mu\text{m}$  の AlN 薄膜を形成した。AlN 薄膜の形成は、反応性 RF マグネトロンスパッタ法により行った。熱燐酸を  
15 使用した湿式エッチングにより、AlN 薄膜を所定の形状にパターン化して圧電体膜 16 を形成した。その後、DC マグネトロンスパッタ法及びリフトオフ法を使用して、厚さ  $0.1\ \mu\text{m}$  の Mo からなる上部電極 17 を形成した。上部電極 17 の主体部 17a は平面寸法  $140\times 160\ \mu\text{m}$  の矩形に近い形状とし、下部電極主体部 15a に対応する位置に配置した。

20 次に、以上のようにして得られた構造体の上下部電極 15, 17 及び圧電体膜 16 の形成されている側を PMMA 樹脂で被覆し、Si 基板 112 の下面に形成したパターン状  $\text{SiO}_2$  層をマスクとして、振動部 121 に対応する Si 基板 112 の部分を KOH 水溶液でエッチング除去して、空隙となるビアホール 120 を形成した。Si 基板 112 の上面に形成され  
25 たビアホール開口の寸法 (振動部 21 の平面寸法) は、 $200\times 200\ \mu\text{m}$  であった。

以上の工程により得られた薄膜圧電共振子 (FBAR) について、カスケード・マイクロテック製マイクロ波プローバ及びネットワークアナライザを使用して、上記薄膜圧電共振子の電極端子 15b, 17b 間のイン  
30 ピーダンス特性を測定すると共に、共振周波数  $f_r$  および反共振周波数

$f_a$  の測定値から、電気機械結合係数  $k_t^2$  や周波数温度特性  $\tau_r$ 、及び音響的品質係数  $Q$  を求めた。得られた圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数  $k_t^2$ 、周波数温度特性  $\tau_r$ 、及び音響的品質係数  $Q$  は表 3 に示す通りであった。

5      【実施例 16～18】

本実施例では、以下のようにして、図 24、25 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。

即ち、上部電極 17 の形成の後であってビアホール 120 の形成の前に、上部電極 17 上に RF マグネトロンスパッタ法により厚さ 0.1～0.3  $\mu\text{m}$  の  $\text{SiO}_2$  層を形成し、振動部 121 に対応するようにパターン化して上部絶縁層 18 を形成すること、及び、下部絶縁層 13 の厚さ及び圧電体膜 16 の厚さを表 3 に示されているようにすること以外は、実施例 13～15 と同様の工程を実施した。

15      以上の工程により得られた薄膜圧電共振子 (FBAR) について、実施例 13～15 と同様にして圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数  $k_t^2$ 、周波数温度特性  $\tau_r$ 、及び音響的品質係数  $Q$  は表 3 に示す通りであった。

    【実施例 19～22】

20      本実施例では、以下のようにして、図 26、27 に示されている構造の圧電薄膜共振子及び図 28、29 に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。

即ち、上下部絶縁層 13、18 の厚さ及び圧電体膜 16 の厚さを表 3 に示されているようにすること、及び、上下部電極 15、17 の形状及び寸法を除いて、実施例 13～15 と同様の工程【実施例 19、20】及び実施例 16～18 と同様の工程【実施例 21、22】を実施した。下部電極 15 は振動部 121 に対応する領域を含むように延びている平面寸法 150  $\times$  300  $\mu\text{m}$  の矩形状のものとし、上部電極 17 はそれぞれ平面寸法 70  $\times$  90  $\mu\text{m}$  の矩形に近い形状の主体部 17Aa、17Ba が間隔 20  $\mu\text{m}$  をおいて配置されたものとした。

30      以上の工程により得られた薄膜圧電共振子 (FBAR) について、実施



例13～15及び実施例16～18と同様にして圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 $k_t^2$ 、周波数温度特性 $\tau_f$ 及び音響的品質係数 $Q$ は表3に示す通りであった。

〔実施例23～25〕

- 5 本実施例では、以下のようにして、図22、23に示されている構造の圧電薄膜共振子及び図24、25に示されている構造の圧電薄膜共振子を作製した。

- 10 即ち、圧電体膜16の厚さ及び上下絶縁層13、18の厚さを表3に示されているようにすることを除いて、実施例13と同様の工程〔実施例23、24〕及び実施例16と同様の工程〔実施例25〕を実施した。

以上の工程により得られた薄膜圧電共振子(FBAR)について、実施例13及び実施例16と同様にして圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 $k_t^2$ 、周波数温度特性 $\tau_f$ 及び音響的品質係数 $Q$ は表3に示す通りであった。

- 15 〔比較例6、7〕

上下電極層の材料としてMoに代えてアルミニウム(Al)を用い、圧電体膜16の厚さ及び絶縁層13の厚さを表3に示されているようにすることを除いて、実施例13と同様の工程を実施した。

- 20 以上の工程により得られた薄膜圧電共振子(FBAR)について、実施例13と同様にして圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 $k_t^2$ 、周波数温度特性 $\tau_f$ 及び音響的品質係数 $Q$ は表3に示す通りであった。

〔比較例8〕

- 25 絶縁層13を振動部121に対応する領域外にのみ形成したことを除いて、実施例13と同様の工程を実施した。

以上の工程により得られた薄膜圧電共振子(FBAR)について、実施例13と同様にして圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結合係数 $k_t^2$ 、周波数温度特性 $\tau_f$ 及び音響的品質係数 $Q$ は表3に示す通りであった。

- 30 〔比較例9、10〕

圧電体膜16の材料としてAlNに代えて酸化亜鉛(ZnO)を用い、  
圧電体膜16の厚さ及び絶縁層13の厚さを表3に示されているようにす  
ることを除いて、実施例13と同様の工程を実施した。

5 以上の工程により得られた薄膜圧電共振子(FBAR)について、実施  
例13と同様にして圧電薄膜共振子の厚み振動の基本周波数、電気機械結  
合係数 $k_t^2$ 、周波数温度特性 $\tau_f$ 及び音響的品質係数Qは表3に示す通り  
であった。

10 以上の結果から、モリブデンを主成分とする電極と窒化アルミニウムを  
主成分とする圧電体膜とで構成された圧電積層構造体の一部を含む振動部  
の共振周波数の温度係数とは異符号の温度係数を有する酸化シリコンを主  
成分とする絶縁層を圧電積層構造体に接合して追加することにより、電気  
機械結合係数と音響的品質係数を維持したまま共振周波数の温度安定性の  
15 良好な圧電薄膜共振子を実現することができ、特に、1GHz以上の高周  
波域で使用されるVCO(圧電薄膜共振子)、フィルタ、送受切替器に適  
用した場合に、その性能を著しく向上させることができる。

[表1]

| F B A R 構 成 |                  |    |                  |     |                  |               |                       |    |               |         |     |   | 音響共振器としての特性         |  |
|-------------|------------------|----|------------------|-----|------------------|---------------|-----------------------|----|---------------|---------|-----|---|---------------------|--|
| 絶 縁 体 層     |                  |    | 下部電極             |     |                  | 圧 電 体 層       |                       |    |               | 上 部 電 極 |     | 電 気 機 械<br>結 合 係 数<br>k <sub>t</sub> <sup>2</sup> (%) | 音響的<br>品 質 係 数<br>Q |  |
| 材質          | 表面粗さ<br>RMS (nm) | 材質 | 表面粗さ<br>RMS (nm) | 材質  | 表面粗さ<br>RMS (nm) | ○軸方向<br>(deg) | ロッキングカーブ<br>FWHM(deg) | 材質 | うねり高さ<br>(nm) |         |     |   |                     |  |
| 実施例 1       | --               | Mo | 15               | ZnO | 11               | 88.5          | 2.5                   | Mo | 200           | 5.5     | 700 |   |                     |  |
| 実施例 2       | --               | Mo | 15               | AlN | 14               | 88.5          | 2.8                   | Mo | 200           | 6.5     | 900 |   |                     |  |
| 実施例 3       | 10               | Mo | 15               | ZnO | 10               | 88.5          | 2.3                   | Mo | 200           | 4.5     | 650 |   |                     |  |
| 実施例 4       | --               | Mo | 15               | AlN | 14               | 88.5          | 2.8                   | Mo | 150           | 7.5     | 950 |   |                     |  |
| 実施例 5       | --               | Mo | 13               | AlN | 10               | 89.5          | 2.2                   | Mo | 150           | 6.7     | 980 |   |                     |  |
| 実施例 6       | 12               | Mo | 17               | AlN | 15               | 88.4          | 2.8                   | Mo | 210           | 5.2     | 700 |   |                     |  |
| 比較例 1       | --               | Mo | 80               | ZnO | 75               | 85.0          | 7.0                   | Mo | 1000          | 3.0     | 400 |   |                     |  |
| 比較例 2       | --               | Mo | 85               | AlN | 80               | 83.0          | 8.5                   | Mo | 1250          | 3.5     | 450 |   |                     |  |
| 比較例 3       | 85               | Mo | 90               | ZnO | 85               | 83.0          | 9.5                   | Mo | 1000          | 2.8     | 360 |   |                     |  |

[表2]

| F B A R 構 成 |       |                               |            |       |                  |     |                  |               |                        |    |          |         |   | 密着強度         | 音響共振器としての特性 |  |
|-------------|-------|-------------------------------|------------|-------|------------------|-----|------------------|---------------|------------------------|----|----------|---------|---|--------------|-------------|--|
|             | 密着電極層 |                               |            | 下方電極層 |                  |     | 圧電体薄膜層           |               |                        |    | 上方電極層の材質 | ピールング試験 | 電気機械結合係数<br>k <sub>e</sub> <sup>2</sup> (%) | 音響的品質係数<br>Q |             |  |
|             | 材質    | 平面面積<br>S1 (μm <sup>2</sup> ) | 厚さ<br>(nm) | 材質    | 表面粗さ<br>RMS (nm) | 材質  | 表面粗さ<br>RMS (nm) | c軸方向<br>(deg) | ロッキングカーブ<br>FWHM (deg) |    |          |         |   |              |             |  |
| 実施例7        | Cr    | 4,500                         | 100        | Au    | 7                | ZnO | 4                | 88.6          | 2.3                    | Au | 剥離無し     | 5.5     | 1145  |              |             |  |
| 実施例8        | Ti    | 4,500                         | 20         | Au    | 10               | ZnO | 9                | 89.2          | 2.1                    | Au | 剥離無し     | 5.9     | 772   |              |             |  |
| 実施例9        | Cr    | 4,500                         | 60         | Pt    | 9                | ZnO | 6                | 88.8          | 2.5                    | Pt | 剥離無し     | 5.2     | 898   |              |             |  |
| 実施例10       | Ni    | 15,000                        | 50         | Au    | 12               | ZnO | 11               | 89.0          | 2.9                    | Au | 剥離無し     | 4.8     | 707   |              |             |  |
| 実施例11       | Ti    | 4,000                         | 30         | Pt    | 9                | AlN | 7                | 90.0          | 2.7                    | Pt | 剥離無し     | 6.4     | 984   |              |             |  |
| 実施例12       | Cr    | 5,000                         | 40         | Mo    | 8                | AlN | 5                | 89.8          | 2.9                    | Mo | 剥離無し     | 6.1     | 1140  |              |             |  |
| 比較例4        | Cr    | 27,225                        | 20         | Au    | 40               | ZnO | 30               | 87.5          | 4.8                    | Au | 剥離無し     | 2.5     | 404   |              |             |  |
| 比較例5        | —     | —                             | —          | Au    | 28               | ZnO | 23               | 88.4          | 4.2                    | Au | 剥離有り     | 3.2     | 446   |              |             |  |

[表3]

|       | FBAR構成  | 圧電体薄膜<br>厚さ (μm) |    | 絶縁層厚さ (μm) |      | 膜厚比<br>$t'/t$ | 共振周波数<br>$f_r$ (GHz) | 反共振周波数<br>$f_a$ (GHz) | 電気機械結合<br>係数 $k_e^2$ (%) | 周波数温度係数<br>$\tau_f$ (ppm/°C) | 音響的<br>品質係数Q |
|-------|---------|------------------|----|------------|------|---------------|----------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|--------------|
|       |         | 下部               | 上部 | 下部         | 上部   |               |                      |                       |                          |                              |              |
| 実施例13 | 図22, 23 | 1.60             | —  | 0.50       | —    | 0.31          | 2.055                | 2.093                 | 4.4                      | 3.7                          | 1640         |
| 実施例14 | 図22, 23 | 2.00             | —  | 0.30       | —    | 0.15          | 2.049                | 2.090                 | 4.8                      | -13.4                        | 1720         |
| 実施例15 | 図22, 23 | 1.30             | —  | 0.60       | —    | 0.46          | 2.118                | 2.155                 | 4.2                      | 14.5                         | 1120         |
| 実施例16 | 図24, 25 | 1.60             | —  | 0.30       | 0.20 | 0.31          | 2.030                | 2.076                 | 5.3                      | 4.2                          | 1610         |
| 実施例17 | 図24, 25 | 1.90             | —  | 0.30       | 0.10 | 0.21          | 2.005                | 2.051                 | 5.5                      | -5.6                         | 1800         |
| 実施例18 | 図24, 25 | 1.30             | —  | 0.30       | 0.30 | 0.46          | 2.158                | 2.202                 | 4.9                      | 14.2                         | 1060         |
| 実施例19 | 図26, 27 | 1.90             | —  | 0.40       | —    | 0.21          | 1.984                | 2.024                 | 4.7                      | -3.9                         | 1670         |
| 実施例20 | 図26, 27 | 1.30             | —  | 0.60       | —    | 0.46          | 2.141                | 2.179                 | 4.3                      | 14.4                         | 980          |
| 実施例21 | 図28, 29 | 1.90             | —  | 0.30       | 0.10 | 0.21          | 1.998                | 2.043                 | 5.4                      | -5.1                         | 1650         |
| 実施例22 | 図28, 29 | 1.30             | —  | 0.30       | 0.30 | 0.46          | 2.118                | 2.163                 | 5.1                      | 14.1                         | 940          |
| 実施例23 | 図22, 23 | 1.00             | —  | 0.53       | —    | 0.53          | 2.525                | 2.568                 | 4.1                      | 18.5                         | 800          |
| 実施例24 | 図22, 23 | 2.20             | —  | 0.19       | —    | 0.08          | 2.077                | 2.124                 | 5.5                      | -18.3                        | 1720         |
| 実施例25 | 図24, 25 | 2.10             | —  | 0.10       | 0.08 | 0.08          | 2.091                | 2.144                 | 6.1                      | -18.1                        | 1880         |
| 比較例6  | 図22, 23 | 1.10             | —  | 0.60       | —    | 0.55          | 2.262                | 2.293                 | 3.3                      | 24.0                         | 320          |
| 比較例7  | 図22, 23 | 1.60             | —  | 0.50       | —    | 0.31          | 1.774                | 1.800                 | 3.5                      | -20.5                        | 550          |
| 比較例8  | 図22, 23 | 2.20             | —  | —          | —    | —             | 2.318                | 2.375                 | 5.8                      | -35.0                        | 1750         |
| 比較例9  | 図22, 23 | 1.90             | —  | 0.16       | —    | 0.08          | 2.136                | 2.171                 | 3.9                      | -47.4                        | 750          |
| 比較例10 | 図22, 23 | 0.90             | —  | 0.80       | —    | 0.89          | 1.748                | 1.768                 | 2.8                      | 23.7                         | 210          |

### 産業上の利用可能性

以上説明したように、本発明によれば、高さのRMS変動が25nm以下、好ましくは20nm以下という原子レベルで見て平滑な犠牲層表面上に直接または絶縁体層を介して第1の電極を形成し、該第1の電極の表面を高さのRMS変動が25nm以下、好ましくは20nm以下となるようにし、その上に圧電体層を形成するので、第1の電極の結晶性が向上し、これに従って圧電体層の配向性及び結晶品質が著しく改善され、これにより、電気機械結合係数及び音響的品質係数に優れた高性能な薄膜音響共振器が提供される。

また、以上説明したように、本発明によれば、下方電極層と基板との間に密着電極層を設けており、該密着電極層は基板に形成された窪みの周囲において基板と接合されているので、薄膜音響共振器における横方向の振動発生が抑制され、薄膜音響共振器の振動に余分なスプリアス振動が重なることが防止され、薄膜音響共振器およびフィルタの共振特性、品質係数が改善される。また、下方電極層の中央部の下側（すなわち密着電極層により囲まれた内側部分）には密着電極層が存在しないため、下方電極層の中央部を極めて平滑度の高い犠牲層表面上にて形成して配向性及び結晶性を高めることができ、これに基づき配向性及び結晶品質に優れた圧電体薄膜層を形成でき、電気機械結合係数や音響品質係数（Q値）などに優れた高性能な薄膜音響共振器が提供される。更に、密着電極層を用いることで、下方電極層と基板との密着性（接合強度）を向上させることができ、下方電極層の材料選択の幅が広くなり、薄膜音響共振器の耐久性を向上させ長寿命化を図ることができる。

更に、以上説明したように、本発明の圧電薄膜共振子によれば、モリブデンを主成分とする電極と窒化アルミニウムを主成分とする圧電体膜と酸化シリコンまたは窒化シリコンを主成分とする絶縁層との組み合わせを用いているので、電気機械結合係数、音響的品質係数（Q値）及び周波数温度特性の向上が可能となる。

## 請求の範囲

1. 圧電体層と、該圧電体層の第1の表面に接合された第1の電極と、前記圧電体層の前記第1の表面と反対側の第2の表面に接合された第2の電極とを有しており、前記圧電体層の第1の表面は高さのRMS変動が2.5 nm以下であることを特徴とする薄膜音響共振器。  
5
2. 前記圧電体層の第1の表面は高さのRMS変動が20 nm以下であることを特徴とする、請求項1に記載の薄膜音響共振器。
3. 前記圧電体層の前記第2の表面は高さのRMS変動が前記圧電体層の厚さの5%以下であることを特徴とする、請求項1に記載の薄膜音響共振器。  
10
4. 前記第2の電極の表面のうねり高さは前記圧電体層の厚さの25%以下であることを特徴とする、請求項1に記載の薄膜音響共振器。
5. 前記第2の電極は中央部と該中央部より厚い外周部とを有することを特徴とする、請求項1に記載の薄膜音響共振器。  
15
6. 前記外周部は前記中央部の周囲に枠状に位置することを特徴とする、請求項5に記載の薄膜音響共振器。
7. 前記第2の電極は前記中央部の厚さ変動が該中央部の厚さの1%以下であることを特徴とする、請求項5に記載の薄膜音響共振器。
8. 前記外周部の厚さは前記中央部の高さの1.1倍以上であることを特徴とする、請求項5に記載の薄膜音響共振器。  
20
9. 前記外周部は前記第2の電極の外縁から40  $\mu$ mまでの距離の範囲内に位置することを特徴とする、請求項5に記載の薄膜音響共振器。
10. 前記中央部の表面のうねり高さは前記圧電体層の厚さの25%以下であることを特徴とする、請求項5に記載の薄膜音響共振器。  
25
11. 前記圧電体層と前記第1の電極と前記第2の電極とからなる挟み込み構造体は、基板の表面に形成された窪みをまたぐように前記基板により縁部が支持されていることを特徴とする、請求項1に記載の薄膜音響共振器。  
30

12. 前記基板の表面上には、前記窪みをまたぐように形成された絶縁体層が配置されており、該絶縁体層上に前記挟み込み構造体が形成されていることを特徴とする、請求項11に記載の薄膜音響共振器。

5 13. 圧電体層と、該圧電体層の第1の表面に接合された第1の電極と、前記圧電体層の前記第1の表面と反対側の第2の表面に接合された第2の電極とを有しており、前記第1の電極の前記圧電体層の側の表面は高さのRMS変動が25nm以下であることを特徴とする薄膜音響共振器。

10 14. 前記第1の電極の前記圧電体層の側の表面は高さのRMS変動が20nm以下であることを特徴とする、請求項13に記載の薄膜音響共振器。

15 15. 前記圧電体層の前記第2の表面は高さのRMS変動が前記圧電体層の厚さの5%以下であることを特徴とする、請求項13に記載の薄膜音響共振器。

16. 前記第2の電極の表面のうねり高さは前記圧電体層の厚さの25%以下であることを特徴とする、請求項13に記載の薄膜音響共振器。

17. 前記第2の電極は中央部と該中央部より厚い外周部とを有することを特徴とする、請求項13に記載の薄膜音響共振器。

20 18. 前記外周部は前記中央部の周囲に枠状に位置することを特徴とする、請求項17に記載の薄膜音響共振器。

19. 前記第2の電極は前記中央部の厚さ変動が該中央部の厚さの1%以下であることを特徴とする、請求項17に記載の薄膜音響共振器。

25 20. 前記外周部の厚さは前記中央部の高さの1.1倍以上であることを特徴とする、請求項17に記載の薄膜音響共振器。

21. 前記外周部は前記第2の電極の外縁から40 $\mu$ mまでの距離の範囲内に位置することを特徴とする、請求項17に記載の薄膜音響共振器。

30 22. 前記中央部の表面のうねり高さは前記圧電体層の厚さの2.5



%以下であることを特徴とする、請求項17に記載の薄膜音響共振器。

23. 前記圧電体層と前記第1の電極と前記第2の電極とからなる挟み込み構造体は、基板の表面に形成された窪みをまたぐように前記基板により縁部が支持されていることを特徴とする、請求項13に記載の薄膜音響共振器。

24. 前記基板の表面上には、前記窪みをまたぐように形成された絶縁体層が配置されており、該絶縁体層上に前記挟み込み構造体が形成されていることを特徴とする、請求項23に記載の薄膜音響共振器。

25. 圧電体層と、該圧電体層の第1の表面に接合された第1の電極と、前記圧電体層の前記第1の表面と反対側の第2の表面に接合された第2の電極とを有する薄膜音響共振器を製造する方法であって、

基板の表面に窪みを形成し、該窪み内に犠牲層を充填し、該犠牲層の表面を高さのRMS変動が25nm以下となるように研磨し、前記犠牲層の表面の一部の領域と前記基板の表面の一部の領域とにわたってそれらの上に前記第1の電極を形成し、該第1の電極上に前記圧電体層を形成し、該圧電体層上に前記第2の電極を形成し、前記窪み内から前記犠牲層をエッチング除去することを特徴とする、薄膜音響共振器の製造方法。

26. 前記犠牲層の表面を高さのRMS変動が20nm以下となるようにすることを特徴とする、請求項25に記載の薄膜音響共振器の製造方法。

27. 前記第1の電極を厚さ150nm以下に形成し、該第1の電極の上面を高さのRMS変動が25nm以下となるようにすることを特徴とする、請求項25に記載の薄膜音響共振器の製造方法。

28. 前記第1の電極の上面を高さのRMS変動が20nm以下となるようにすることを特徴とする、請求項27に記載の薄膜音響共振器の製造方法。

29. 前記犠牲層の上に前記第1の電極を形成するに先立って絶縁体層を形成することを特徴とする、請求項25に記載の薄膜音響共振器の製造方法。

30. 基板と、該基板上に配置され該基板側の下方電極層及びこれ

と対をなす上方電極層の間に圧電体薄膜層を挟み込むように積層してなる挟み込み構造体とを備える薄膜音響共振器であって、

前記挟み込み構造体は更に前記下方電極層と前記基板との間に位置し且つ前記下方電極層と接合された密着電極層を有しており、該密着電極層は前記基板に前記挟み込み構造体の振動を許容するように形成された窪みの周囲において前記基板と接合されていることを特徴とする薄膜音響共振器。

31. 前記密着電極層は環状に形成されていることを特徴とする、請求項30に記載の薄膜音響共振器。

32. 前記密着電極層の前記下方電極層と接する部分の平面面積を $S1$ とし、前記下方電極層の平面面積を $S2$ としたとき、 $0.01 \times S2 \leq S1 \leq 0.5 \times S2$ の関係が成り立つことを特徴とする、請求項30に記載の薄膜音響共振器。

33. 前記上方電極層は前記密着電極層の内側に対応する領域に位置することを特徴とする、請求項30に記載の薄膜音響共振器。

34. 前記密着電極層はTi、Cr、Ni、Taより選ばれる少なくとも一種を含む材料で構成されていることを特徴とする、請求項30に記載の薄膜音響共振器。

35. 前記下方電極層はAu、Pt、W、Moより選ばれる少なくとも一種を含む材料で構成されていることを特徴とする、請求項30に記載の薄膜音響共振器。

36. 前記圧電体薄膜層はAlNまたはZnOで構成されていることを特徴とする、請求項30に記載の薄膜音響共振器。

37. 請求項30の薄膜音響共振器を製造する方法であって、窪みが形成されている基板の表面において前記窪みの周囲に密着電極層を形成し、該密着電極層より内側の前記窪みに対応する領域にて前記基板の表面上に犠牲層を形成し、該犠牲層の表面を研磨して高さのRMS変動が25nm以下となるように平滑化し、前記犠牲層及び前記密着電極層の上に下方電極層、圧電体薄膜層及び上方電極層を順次形成し、しかる後に前記犠牲層を除去することを特徴とする、薄膜音響共振器の製造方法。

38. 前記犠牲層の表面を研磨して高さのRMS変動が20nm以下となるように平滑化することを特徴とする、請求項37に記載の薄膜音響共振器の製造方法。

39. 前記犠牲層の形成は、先ず前記基板及び前記密着電極層を覆うように犠牲層材料の層を形成し、次いで該犠牲層材料の層を前記密着電極層の表面が露出するように研磨することで行われることを特徴とする、請求項37に記載の薄膜音響共振器の製造方法。

40. 前記犠牲層の除去はエッチングにより行われることを特徴とする、請求項37に記載の薄膜音響共振器の製造方法。

41. 前記犠牲層としてガラス又はプラスチックを用いることを特徴とする、請求項37に記載の薄膜音響共振器の製造方法。

42. 基板と、該基板上に形成された圧電積層構造体とを有しており、前記圧電積層構造体の一部を含んで振動部が構成されており、前記圧電積層構造体は下部電極、圧電体膜および上部電極を前記基板の側からこの順に積層してなるものであり、前記基板は前記振動部に対応する領域にて該振動部の振動を許容する空隙を形成している圧電薄膜共振子において、

前記圧電体膜が窒化アルミニウムを主成分とするものであり、前記下部電極および前記上部電極がモリブデンを主成分とするものであり、前記振動部は前記圧電積層構造体に接合された少なくとも1層の酸化シリコンまたは窒化シリコンを主成分とする絶縁層の少なくとも一部を含んでなることを特徴とする圧電薄膜共振子。

43. 前記圧電体膜の厚さ $t$ と前記少なくとも1層の絶縁層の厚さの合計 $t'$ とが $0.1 \leq t' / t \leq 0.5$ の関係を満たすことを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

44. 前記圧電体膜は前記窒化アルミニウムの含有量が90当量%以上であることを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

45. 前記絶縁層は前記酸化シリコンまたは窒化シリコンの含有量が50当量%以上であることを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

46. 前記下部電極及び前記上部電極は前記モリブデンの含有量が80当量%以上であることを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

5 47. 前記絶縁層のうちの1つが前記基板の表面上に形成されていることを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

48. 前記絶縁層のうちの1つが前記圧電積層構造体の前記基板と反対の側の表面上に形成されていることを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

10 49. 前記基板はシリコン単結晶からなることを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

50. 前記上部電極は互いに離隔して形成された第1の電極部と第2の電極部とからなることを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

15 51. 2.0GHz近傍における共振周波数及び反共振周波数の測定値から求めた電気機械結合係数が4.0~6.5%であり、音響的品質係数が750~2000であり、共振周波数の温度係数が $-20 \sim 20$  ppm/°Cであることを特徴とする、請求項42に記載の圧電薄膜共振子。

FIG. 1

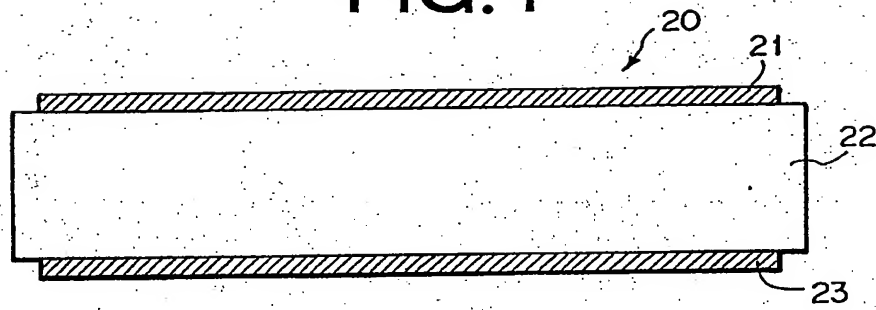
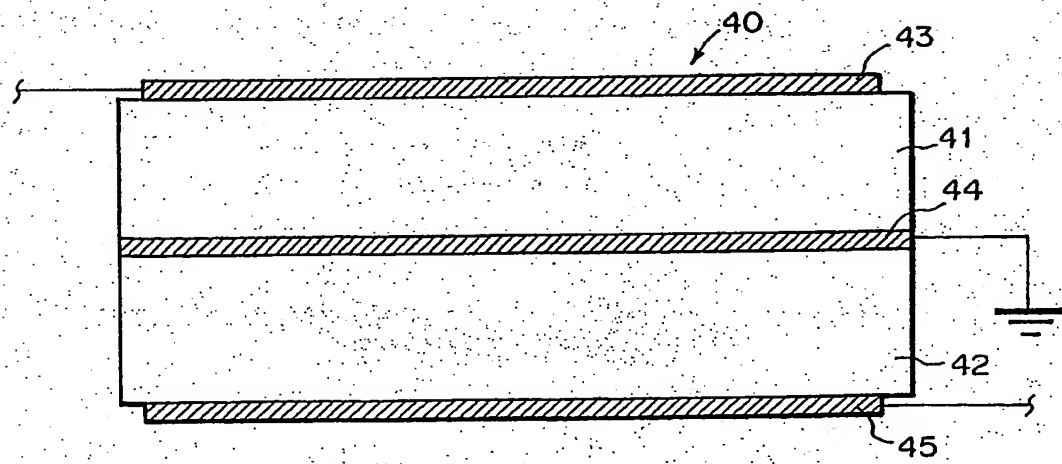


FIG. 2



2/12

FIG.3

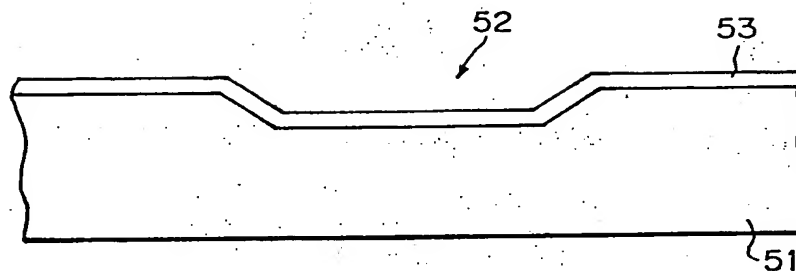


FIG.4

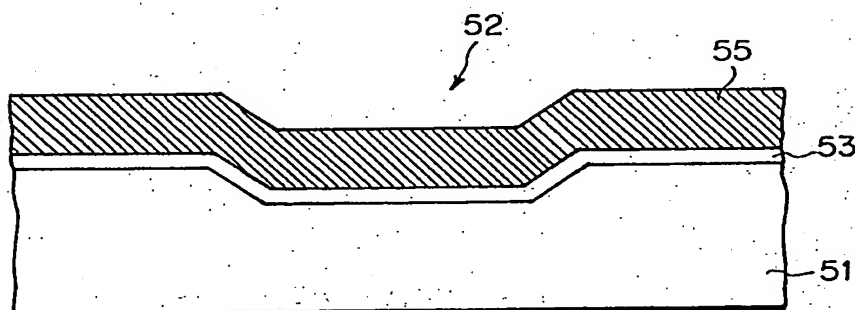


FIG.5

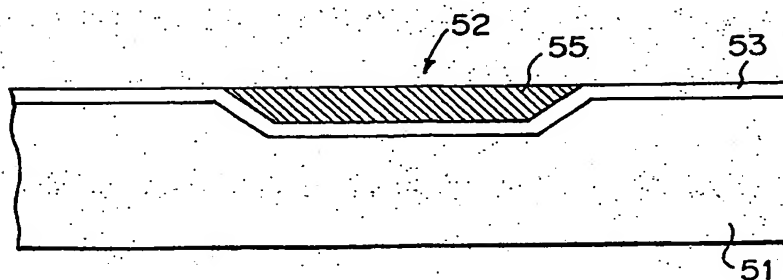


FIG. 6

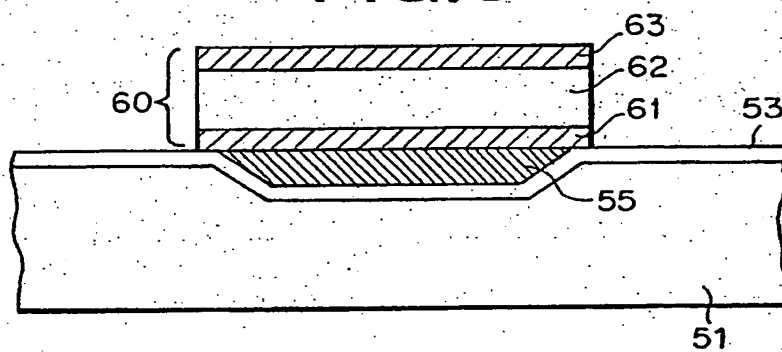


FIG. 7

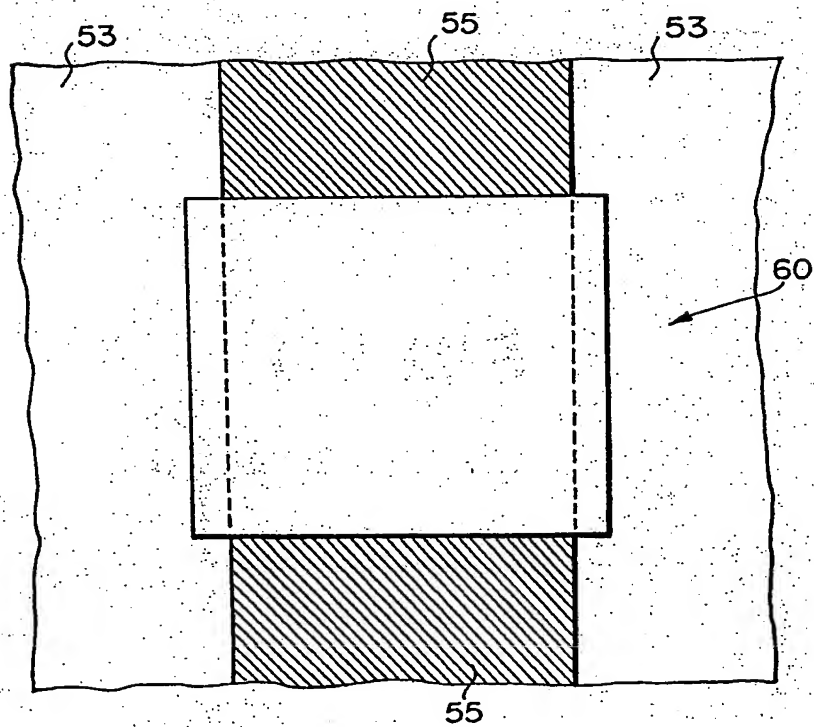


FIG. 8

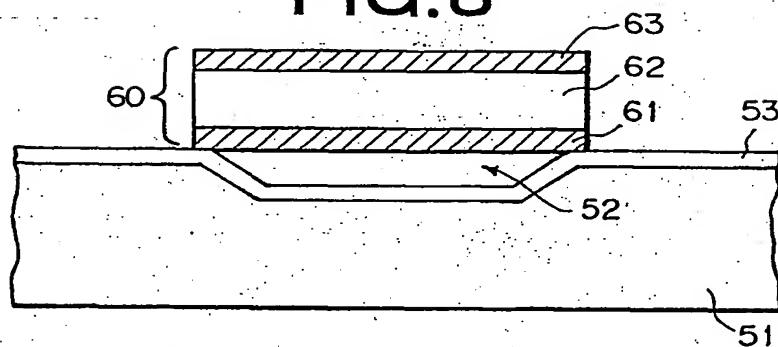


FIG. 9

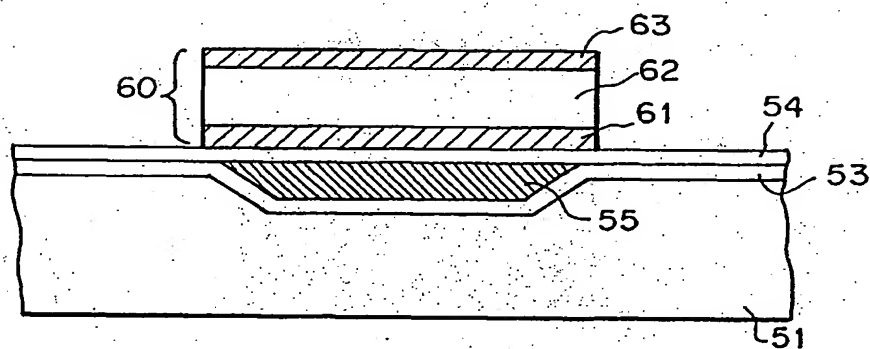


FIG. 10

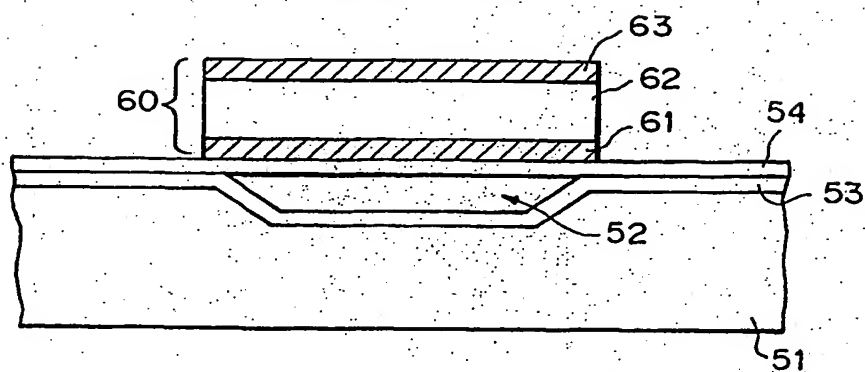




FIG. 11

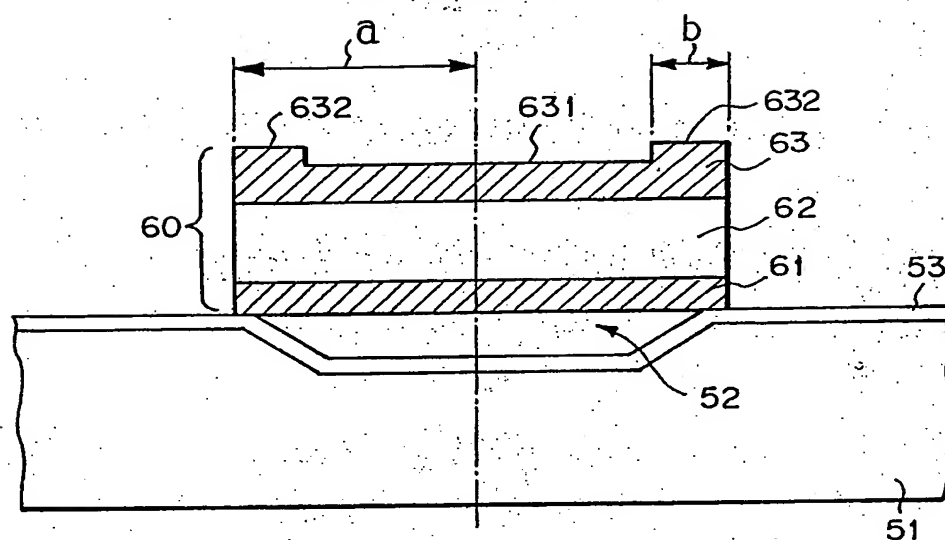
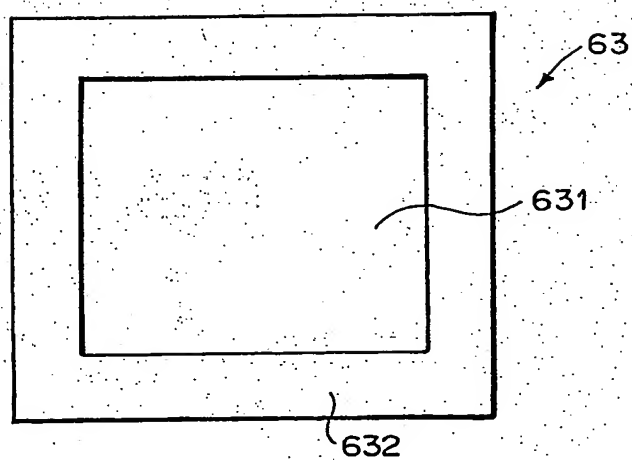


FIG. 12



**FIG. 13**

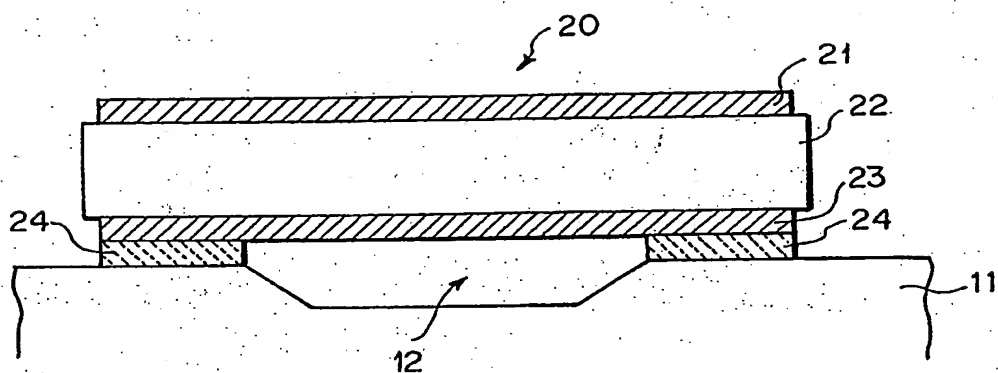
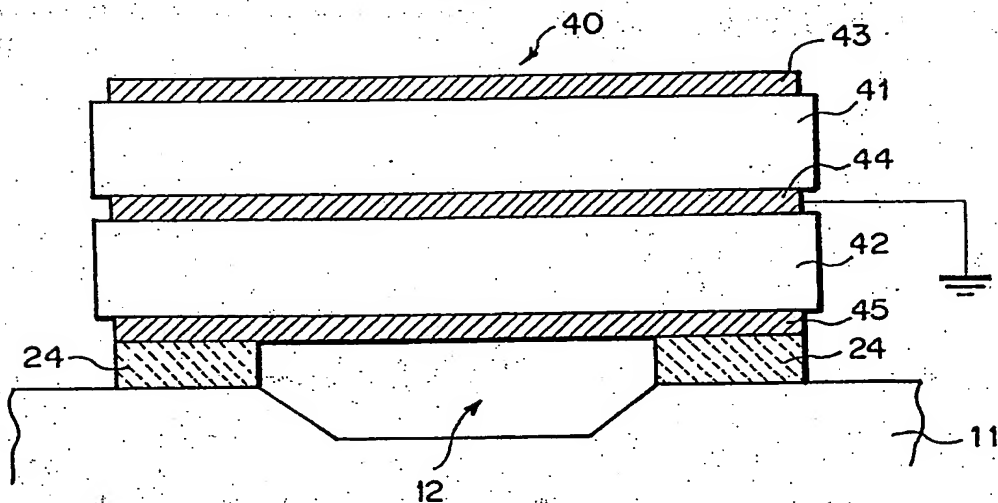


FIG. 14



**FIG. 15**

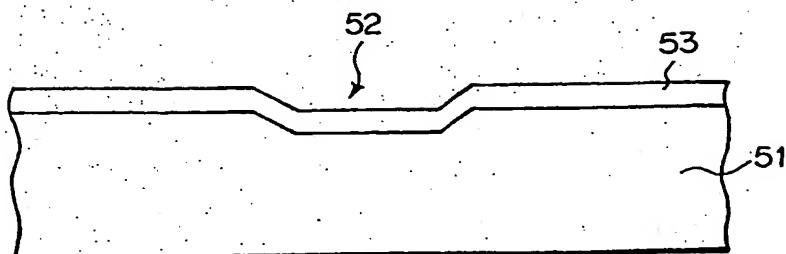


FIG. 16

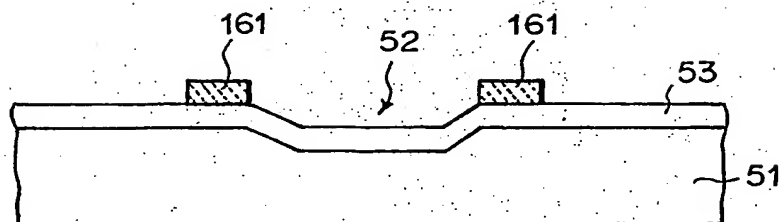


FIG. 17

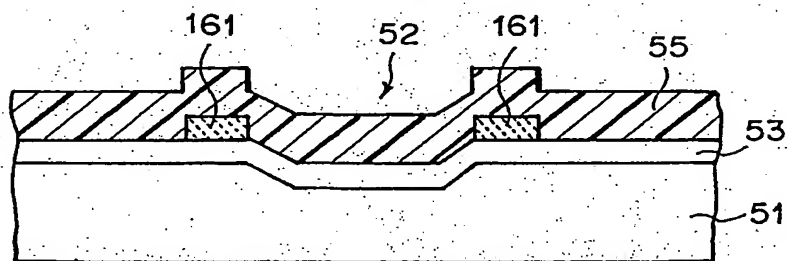


FIG. 18

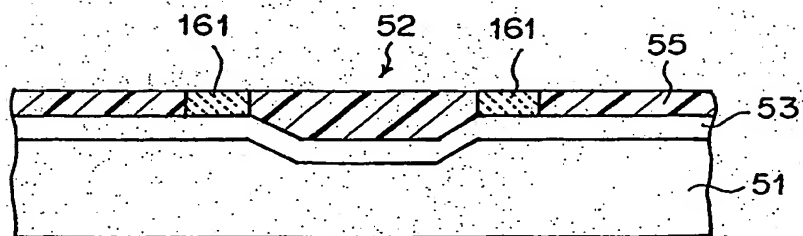


FIG.19

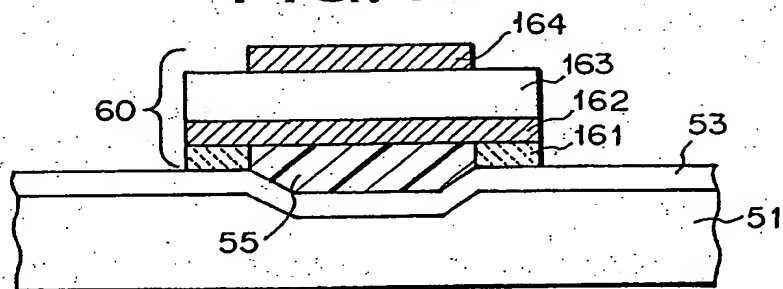


FIG.20

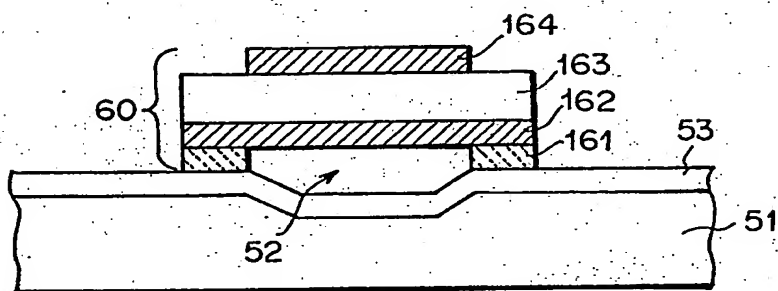


FIG.21

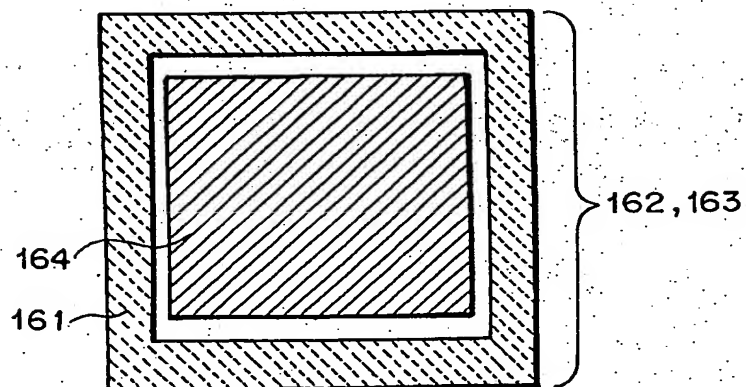


FIG.22

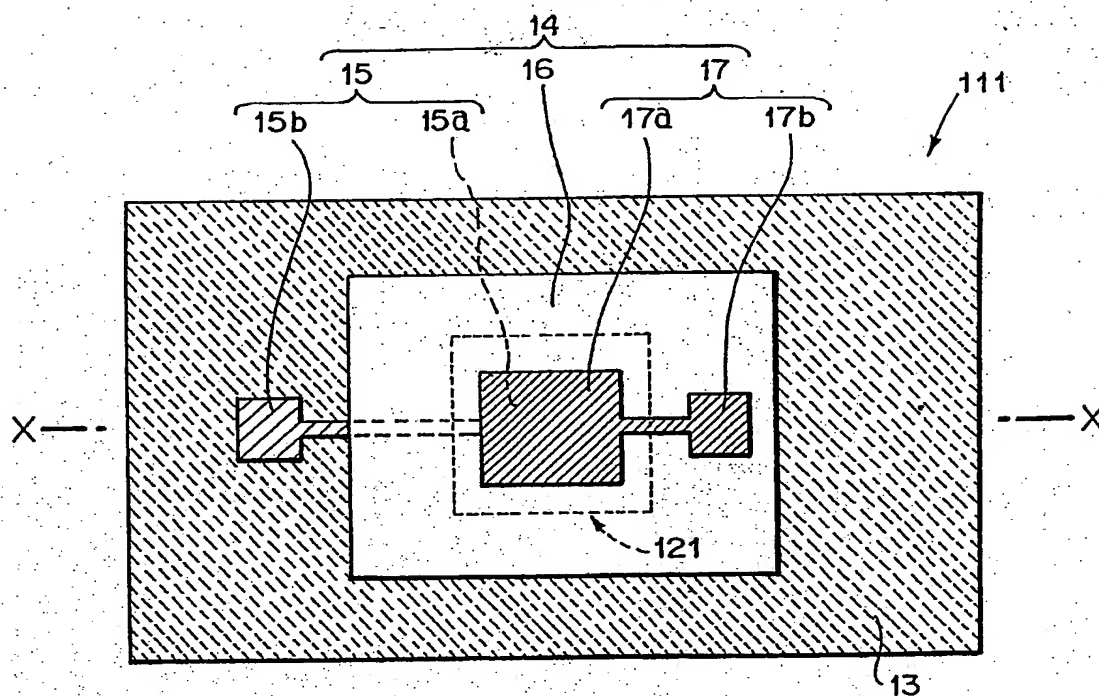
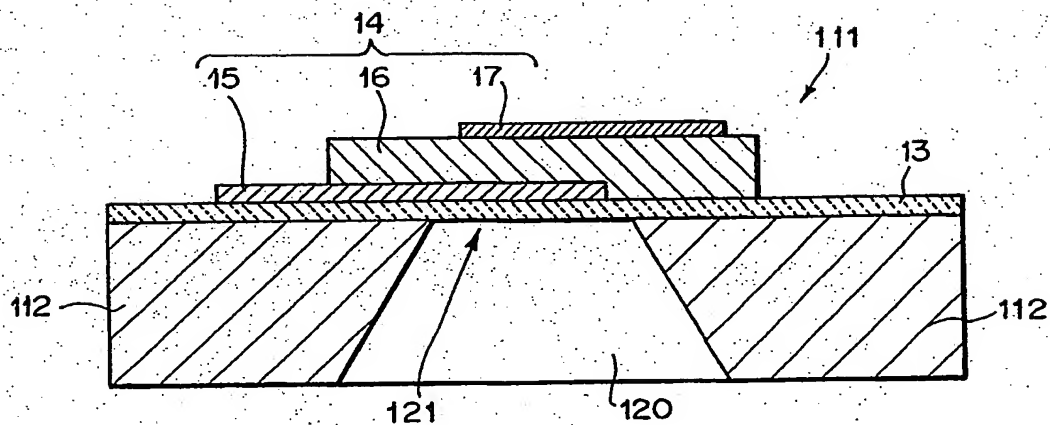


FIG.23



10/12

FIG.24

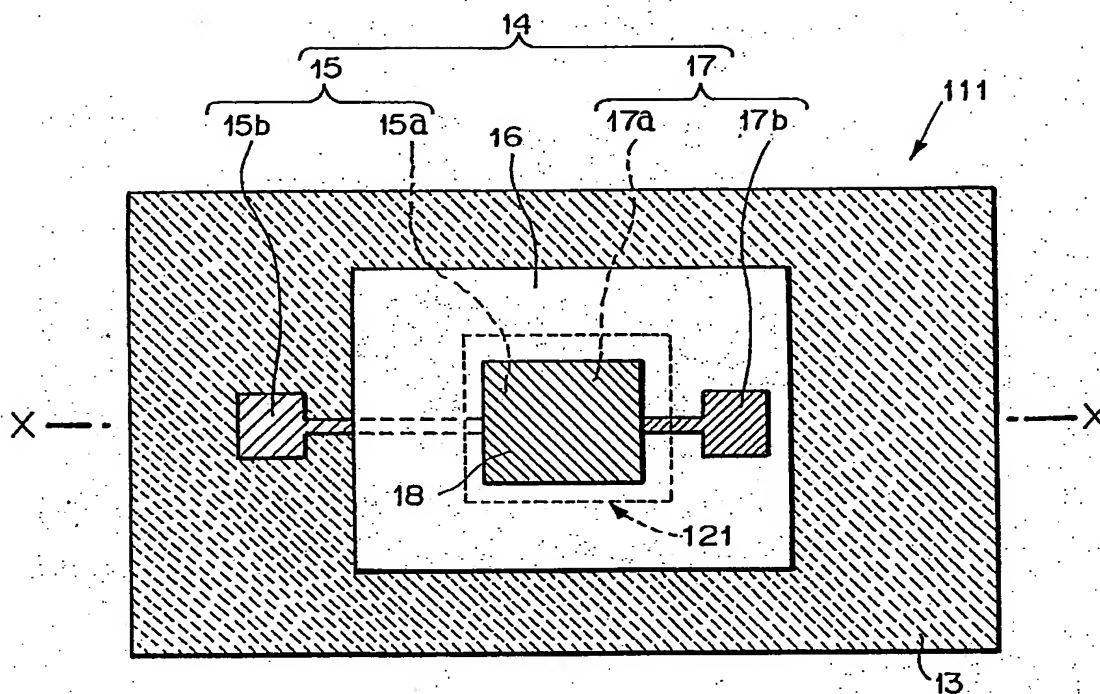


FIG.25

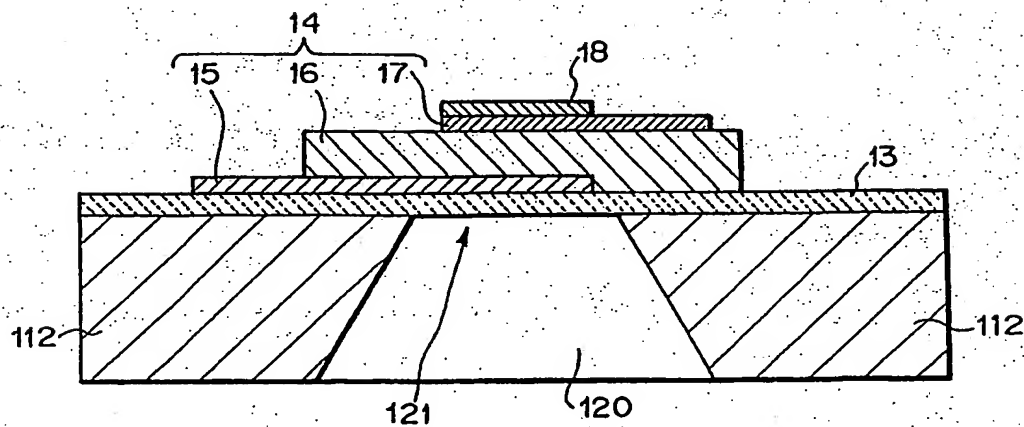


FIG.26

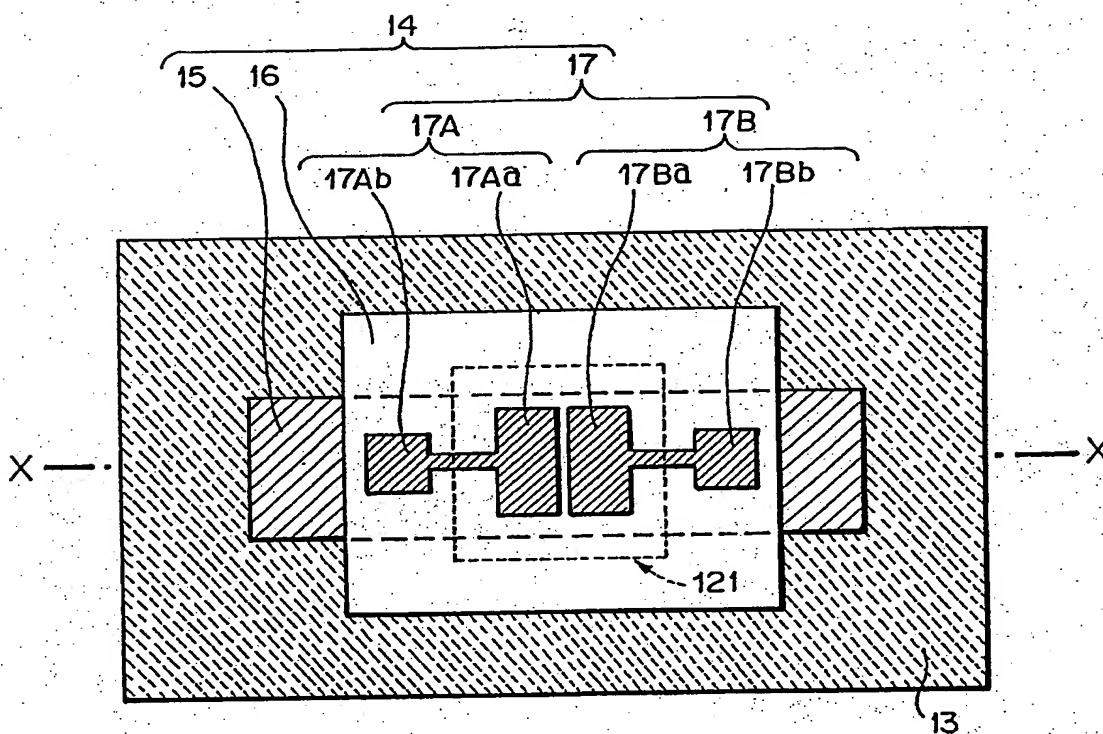
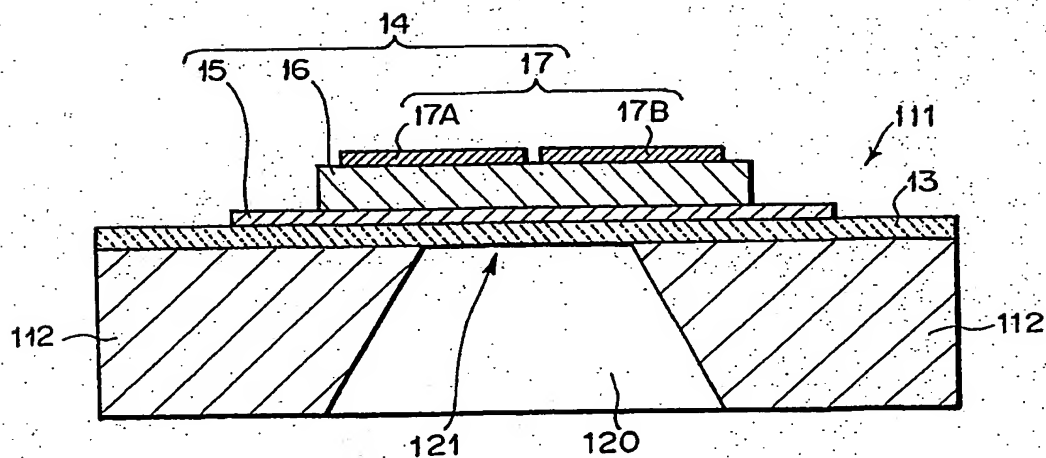


FIG.27



12/12

FIG.28

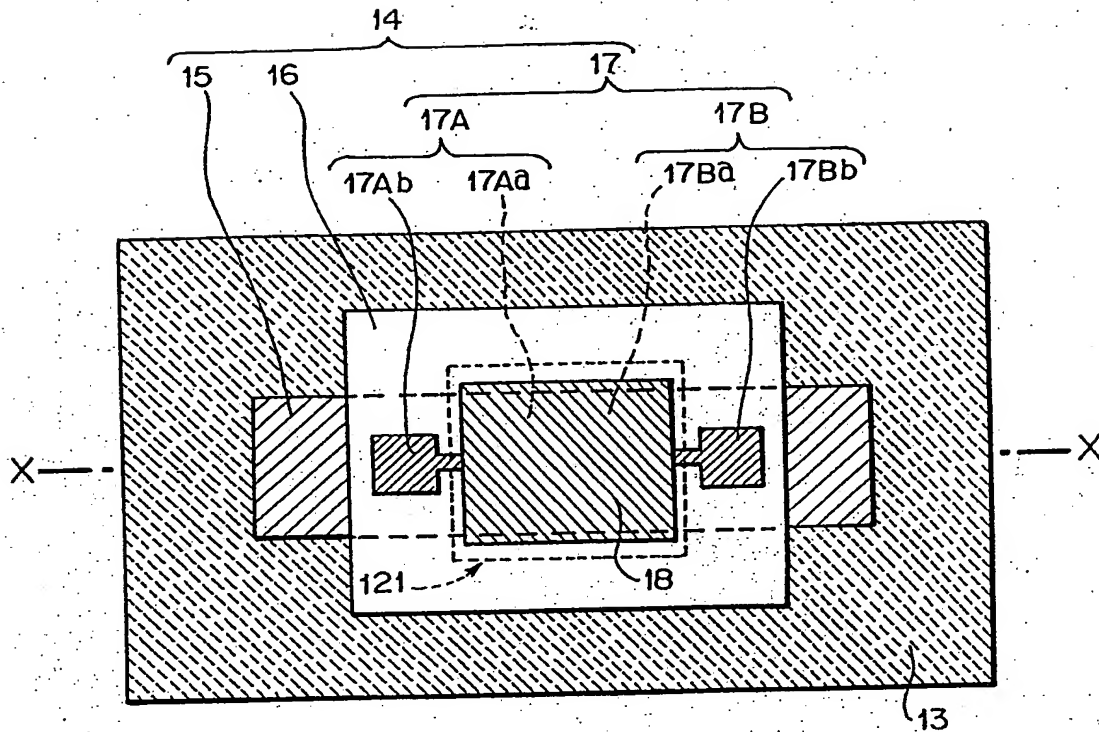
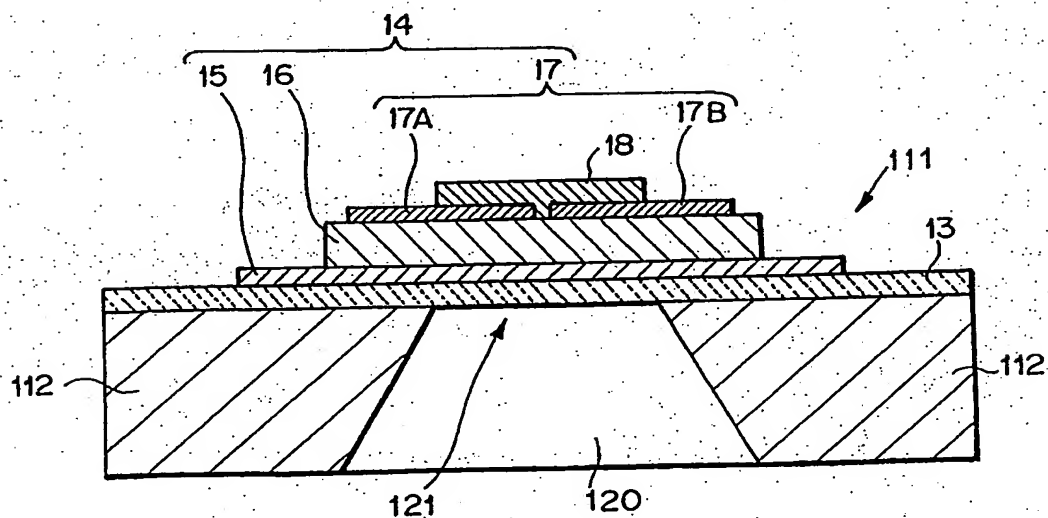


FIG.29





## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

 International application No.  
 PCT/JP02/04574

 A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
 Int.Cl.<sup>7</sup> G10K11/04, H03H9/54

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

 Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
 Int.Cl.<sup>7</sup> G10K11/04, H03H9/54

 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched  
 Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2002  
 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2002 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2002

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages  | Relevant to claim No. |
|-----------|---|-----------------------|
| P, Y      | JP 2001-313535 A (Lucent Technologies Inc.),<br>09 November, 2001 (09.11.01),<br>Par. Nos. [0011], [0014]; Fig. 1<br>(Family: none)                                   | 1-51                  |
| Y         | JP 2000-69594 A (Hewlett-Packard Co.),<br>03 March, 2000 (03.03.00),<br>Par. Nos. [0023] to [0035]; all drawings<br>& US 6060818 A1 & EP 963040 A2                    | 1-51                  |
| Y         | JP 60-103709 A (The United States of America),<br>08 June, 1985 (08.06.85),<br>Pages 3, 4; Fig. 1<br>& GB 8425518 A0 & US 4502932 A1<br>& FR 2553554 A & DE 3437498 A | 1-51                  |

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"I" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

 Date of the actual completion of the international search  
 31 July, 2002 (31.07.02)

 Date of mailing of the international search report  
 13 August, 2002 (13.08.02)

 Name and mailing address of the ISA/  
 Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

| A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))  |   |   |
|--|---|---|
| Int. Cl <sup>7</sup> G10K11/04 H03H9/54  |   |   |
| B. 調査を行った分野  |   |   |
| 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))   |   |   |
| Int. Cl <sup>7</sup> G10K11/04 H03H9/54  |   |   |
| 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの   |   |   |
| 日本国実用新案公報 1922-1996年<br>日本国公開実用新案公報 1971-2002年<br>日本国登録実用新案公報 1994-2002年<br>日本国実用新案登録公報 1996-2002年   |   |   |
| 国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)  |   |   |
| C. 関連すると認められる文献  |   |   |
| 引用文献の<br>カテゴリー*  | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示   | 関連する<br>請求の範囲の番号  |
| PY   | JP 2001-313535 A (ルーセント テクノロジーズ インコーポレイ<br>テッド) 2001.11.09 【0011】、【0014】段落、第1図 (ファミリ<br>ーなし)                  | 1-51  |
| Y  | JP 2000-69594 A (ヒューレット・パッカード・カンパニー) 2000.<br>03.03 【0023】 - 【0035】段落、全図 & US 6060818 A1 & EP 963040<br>A2    | 1-51  |
| Y  | JP 60-103709 A (アメリカ合衆国) 1985.06.08 第3、4頁、第1図<br>& GB 8425518 A0 & US 4502932 A1 & FR 2553554 A & DE 3437498A | 1-51  |
| <input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。   |   |   |
| * 引用文献のカテゴリー<br>「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの<br>「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの<br>「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)<br>「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献<br>「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献<br>「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの<br>「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの<br>「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの<br>「&」 同一パテントファミリー文献 |   |   |
| 国際調査を完了した日   | 31.07.02  | 国際調査報告の発送日 13.08.02                                     |
| 国際調査機関の名称及びあて先   | 日本国特許庁 (ISA/J P)<br>郵便番号 100-8915<br>東京都千代田区霞が関三丁目4番3号  | 特許庁審査官 (権限のある職員)<br>松澤 福三郎<br>電話番号 03-3581-1101 内線 3540 |